

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

**ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ NÁSTROJOVÉ OCELI A MOLDMAX[®] V VE
FIRMĚ DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.**

**ELECTRIC DISCHARGE MACHINING OF TOOL STEEL AND MOLDMAX[®] V
MATERIAL AT DENSO MANUFACTURING CZECH Ltd.**

KOM - 1155

Jiří Valenta

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Jersák, CSc

Konzultant: Ing. Oussama El Bedoui, DENSO MANUFACTURING
CZECH s.r.o.

Počet stran: 75

Počet příloh 3

a tabulek: 27

Počet obrázků : 63

Datum: 27. 5. 2011

Ozna ení DP: 1155

ezitel: Ji í Valenta

**ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁB NÍ NÁSTROJOVÉ OCELI A MATERIÁLU
MOLDMAX[®] V VE FIRM DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.**

ANOTACE:

Tato diplomová práce se zabývá popisem procesu elektroerozivního obráb ní nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V. V teoretické ásti jsou shrnuty poznatky o elektroerozivním obráb ní. Cílem experimentální ásti je stanovit optimální materiál elektrody pro obráb ní nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V z ekonomického hlediska.

**ELECTRIC DISCHARGE MACHINING OF TOOL STEEL AND MOLDMAX[®] V
MATERIAL AT DENSO MANUFACTURING CZECH Ltd.**

ANNOTATION:

This thesis describes the process of electric discharge machining (EDM) of tool steel and MoldMAX[®] V material. The objective of the experimental part is to determine optimal electrode material for tool steel and MoldMAX[®] V machining from the economic perspective.

Klí ová slova: Obráb ní kov , nekonvenční metody, elektroerozivní obráb ní

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokon eno: 2011

Archivní ozna . zprávy:

Po et stran: 75

Po et p íloh: 3

Po et obrázk : 63

Po et tabulek: 27

Po et graf : 22

Místop íse0n prohlazuji, 0e jsem diplomovou práci vypracoval samostatn s
pou0itím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci, 27. 5. 2011

Mé poděkování patří hlavně mému synovi, který byl neskutečně velkou motivací pro dokončení této práce a celého studia.

Na tomto místě bych chtěl také poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc za odbornou pomoc a vedení, za cenné rady a připomínky.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam symbol	8
1. Úvod	10
1.1 Představení firmy DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.	10
1.2 Aktuální situace elektroerozivního obrábění ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.	11
1.3 Cíle diplomové práce	11
2. Teoretická část	12
2.1 Teorie obrábění	12
2.2 Obrábění	12
2.3 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění	13
2.4 Princip elektroerozivního obrábění	14
2.4.1 Detailní popis jednoho obráběcího cyklu	16
2.4.2 Souvislost mezi proudem a teplem	18
2.4.3 Polarita	19
2.5 Pasivní výboje	20
2.6 Generátory	21
2.6.1 Závislé generátory	21
2.6.2. Nezávislé generátory	21
2.7 Dielektrikum	23
2.7.1 Historie dielektrika	23
2.7.2 Úkol dielektrika	23
2.7.3 Požadavky na dielektrikum	23
2.8 Způsob výplach	24
2.9 Stroje pro elektroerozivního obrábění	26
2.10 Nástrojové elektrody	27
3. Metodika	31
3.1 Metodika experimentu	31
3.2 Elektrody pro experiment	31
3.2.1 Materiály pro nástrojové elektrody	32
3.3 Obráběný materiál pro experiment	33
3.4 Strojní vybavení experimentu	34

3.5 Opakovatelnost experimentu	35
3.6 Porovnání drsnosti povrchu	39
4. Experimentální část	40
4.1 Příprava experimentu	40
4.1.1 Výroba elektrod	40
4.1.2 Obráběný materiál.....	41
4.2 Experiment	41
4.2.1 Nastavení obráběcích podmínek.....	42
4.2.2 Ustavení obrobku a nástrojové elektrody	43
4.2.3 Průběh experiment	45
5. Výsledky.....	47
5.1 Výsledky opakovatelnosti experiment	47
5.2 Doba přípravy elektrod	48
5.3 Porovnání obráběcích časů	49
5.3.1 Porovnání obráběcích časů hrubovací elektrodou	49
5.3.2 Porovnání obráběcích časů dokončovací elektrodou.....	53
5.3.3 Celkové časy obrábění.....	55
5.4. Naměřené drsnosti povrchů	56
5.5 Opotřebení nástrojových elektrod.....	57
5.5.1 Opotřebení hrubovací elektrody.....	58
5.5.2 Opotřebení dokončovací elektrody.....	59
5.6 Ekonomické hodnocení	62
5.6.1 Náklady na výrobu jednotlivých elektrod.....	62
5.6.2 Náklady na hrubování	63
5.6.2 Náklady na dokončování.....	66
5.6.3 Celkové náklady.....	69
5.6.4 Zhodnocení celkových nákladů při poruše vstřikovací formy	70
6. Shrnutí a hodnocení výsledků	73
Seznam použité literatury.....	75
Přílohy	75

Seznam zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
Amcloy 940		Materiál pro výrobu vstřikovacích forem
BMW		Bayerische Motoren Werke
CNC		Computer Numeric Control
CU		M
SN		československá norma
EDM		Electrical discharge machining
GAP	[mm]	Jiskrová mezera
HPM7		Nástrojová ocel pro výrobu vstřikovacích forem dle JIS
ISO		International Organization for Standardization
JIS		Japanese Industrial Standard
K		Koruna česká
Ltd.Co.		Limited company
MoldMAX® V		Materiál pro výrobu vstřikovacích forem
RC		Analogový oscilační elektrický obvod složený z cívky a kondenzátoru
RCL		Analogový oscilační elektrický obvod složený z rezistoru, cívky a kondenzátoru
s.r.o.		Společnost s ručením omezeným
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
VW		Volkswagen
x,y,z		Kartézský souřadný systém

Seznam symbol

a	[mm]	Velikosti pracovní mezery
C _{el}	[K]	Cena elektrody
C _{mat}	[K]	Cena polotovaru
CN _{fin}	[K]	Celkové náklady na dokončení
CN _{hrub}	[K]	Celkové náklady na hrubování
d	[mm]	Průměr nástrojové elektrody
D	[mm]	Požadovaný rozměr dutiny
d _{fin}	[mm]	Průměr dokončovací elektrody
hl _{skut}	[mm]	Skutečná hloubka otvoru po hrubování
hl _{vykres}	[mm]	Výkresová hloubka otvoru
I	[A]	Proud
JC _{pol}	[K /dm ³]	Jednotková cena polotovaru elektrody
JCS _{EDN}	[K /hod]	Jednotková cena stroje EDM
M _m	[mm]	Zmenšení finizování nástrojové elektrody
n	[-]	počet měření
N _{fin}	[K]	Náklady na dokončení

N_{hrub}	[K]	Náklady na hrubování
N_{vy_el}	[K]	Náklady na výrobu elektrody
OP_{fin_el}	[mm]	Opot ebení dokončovací elektrody
OP_{oproc}	[%]	Procentuální opot ebení nástrojové elektrody
q	[-]	časové využití periody výboje
R_a	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
R_{max}	[μm]	Největší výška nerovností
R_z	[μm]	Výška nerovností profilu z deseti bod
T	[s]	Doba periody
T_0	[s]	Doba trvání periody
t_0	[s]	doba trvání pauzy
t_{99}	[-]	Konstanta pro úroveň spolehlivosti 99%
t_{fin}	[hod]	čas dokončování
t_{hrub}	[hod]	čas hrubování
t_i	[s]	Doba trvání pulzu
t_{skut_cas}	[-]	Skutečný interval spolehlivosti pro čas
t_{skut_cas}	[-]	Skutečný interval spolehlivosti pro opot ebení
U	[V]	Napětí
V_{pol}	[mm ³]	Objem polotovaru elektrody
x_{cas}	[min]	Průměrný čas obrábění
x_{cas_max}	[min]	Maximální hodnota měření času
x_{cas_min}	[min]	Minimální hodnota měření času
x_{i_cas}	[min]	Jednotlivá měření času obrábění
x_{i_op}	[mm]	Jednotlivé hodnoty opot ebení nástrojové elektrody
x_{max_cas}	[min]	Maximální hodnota statistického intervalu pro čas
x_{max_op}	[mm]	Maximální hodnota statistického intervalu pro opot ebení
x_{min_cas}	[min]	Minimální hodnota statistického intervalu pro čas
x_{min_op}	[mm]	Minimální hodnota statistického intervalu pro opot ebení
x_{op}	[mm]	Aritmetický průměr opot ebení nástrojové elektrody
x_{op}	[-]	Směrodatná odchylka pro dobu obrábění
x_{op_max}	[min]	Maximální hodnota měření pro opot ebení
x_{op_min}	[min]	Minimální hodnota měření pro opot ebení
z	[mm]	Tloušťka narušené vrstvy elektroerozivním obráběním
	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná vodivost materiálu
	[W.mm ⁻²]	Koncentrace energie na plochu

1. Úvod

Firma DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. v současné době využívá pro výrobu vstřikovacích forem nástrojovou ocel. Vzhledem ke snaze o zkrácení výrobního cyklu během procesu vstřikování je nutné použít intenzivnější chlazení forem. Jednou z možností je vytvořit přestup tepla mezi vstřikovaným plastem a chladicí vodou, z tohoto důvodu se hledají nové materiály s lepší tepelnou vodivostí.

Používaná nástrojová ocel má tepelnou vodivost pouze $37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a tvrdost 29-33 HRC. Nově používaný materiál MoldMAX[®] V má při stejné tvrdosti lepší tepelnou vodivost, která je $160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tato diplomová práce je věnována elektroerozivnímu obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V pomocí nástrojových elektrod různých materiálů. Hlavním důvodem výběru tohoto materiálu je rozdílný způsob elektroerozivního obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®] V.

1.1 Představení firmy DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.

DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. patří do globální skupiny společností DENSO. Mateřská firma DENSO byla založena v roce 1949 v Japonsku pod názvem Nippondenso Co. Ltd. osamostatněním od firmy Toyota Motor Ltd. Co.. Firma se orientuje na automobilový průmysl a průmyslové systémy.

Česká pobočka byla založena v Liberci v roce 2001. Je jedním evropským výrobcem klimatizačních jednotek a jejich součástí pro vozy značek Toyota, VW, Audi, Škoda, Lamborghini, Mercedes-Benz, BMW, Suzuki a mnoha dalších. [7]



Obr. 1.1 Společnost DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.[7]

1.2 Aktuální situace elektroerozivního obrábění ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.

Firma *DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.* v současné době pro obrábění vstřikovacích forem z nástrojové oceli používá manganové elektrody. Podíl obrábění nástrojové oceli elektroerozivním způsobem je 95 %. Se zvyšujícím se požadavkem na efektivitu chlazení vstřikovacích forem je plánováno pro jejich výrobu využít moderních materiálů. Jako nejvhodnější pro konstrukci forem byl vybrán materiál MoldMAX® V. Podíl elektroerozivního obrábění vstřikovacích forem z oceli je plánován na 30 % - 40 %, podíl obrábění vstřikovacích forem z materiálu MoldMAX® V je plánován na 45 % - 55 %. Zbývajících 15 % tvoří obrábění ostatních materiálů jako např. Amcloy 940. Jelikož se do budoucna uvažuje o výrobě forem převážně z materiálu MoldMAX® V, je nutné najít efektivní řešení pro elektroerozivní obrábění tohoto materiálu.

1.3 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je zjistit, zda je pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. výhodnější při obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX® V používat obráběcí elektrody manganové, grafitové (EDM-1, EDM-200) nebo grafitové syčené manganové (EDM-C3, EDM-C200).

Hlavním kritériem je porovnat obrábění pomocí jednotlivých elektrod z ekonomického hlediska.

Dílejší cíle pro porovnání obrábění jsou:

- čas elektroerozivního obrábění,
- opotřebení nástrojových elektrod po elektroerozivním obrábění,
- vhodnost jednotlivých typů elektrod v závislosti na složitosti hloubeného tvaru,
- rychlost přípravy jednotlivých elektrod,
- kvalita obrobeného povrchu.

2. Teoretická část

2.1 Teorie obrábění

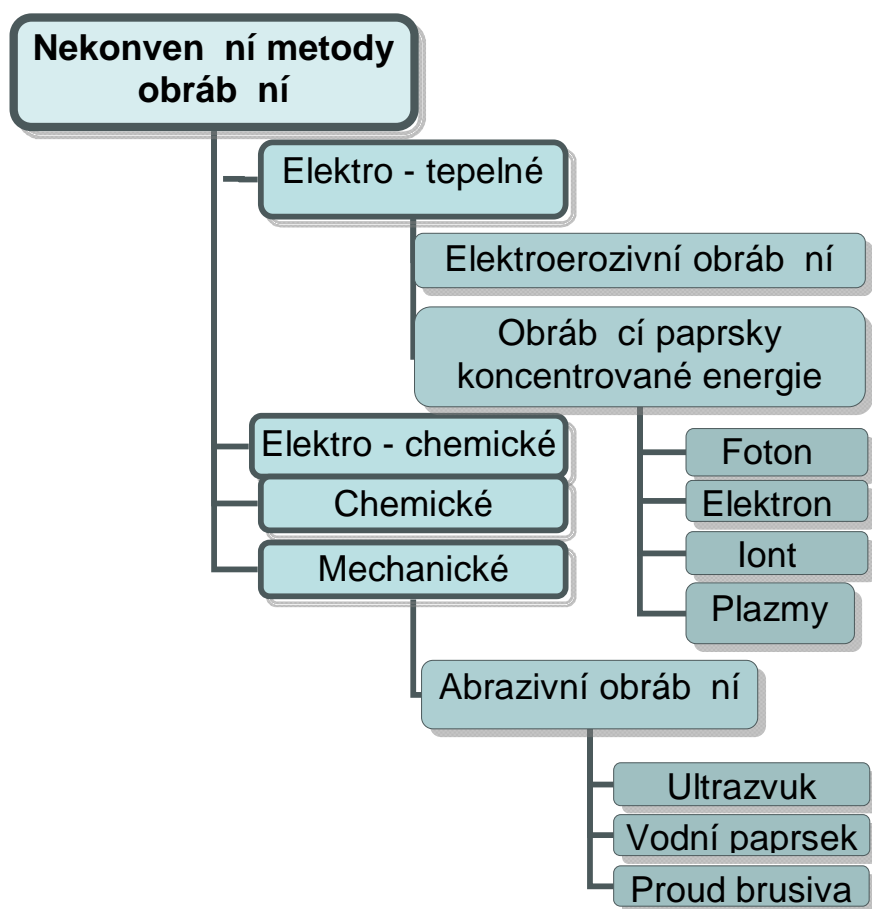
Obrábění je proces, kdy z obráběného polotovaru vzniká požadovaný obrobek, který splňuje všechny požadované rozměry, tvar a jakost povrchu.

2.2 Obrábění

Při konvenčním způsobu obrábění jako je vrtání, frézování či soustružení, vniká do obráběného materiálu obráběcí nástroj, který má definovanou geometrii nástroje. Z obrobku pak dochází k oddělování materiálu mechanicky.

Nekonvenční metody obrábění využívají jiného fyzikálního nebo fyzikálně-chemického principu. Vztahem dochází k bezsilovému působení na obráběný materiál bez vzniku klasických třísek.

Podle principu účinku materiálu tak do skupiny nekonvenčních metod obrábění adíme elektroerozivní obrábění. [1]



Tab. 2.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [1]

2.3 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění

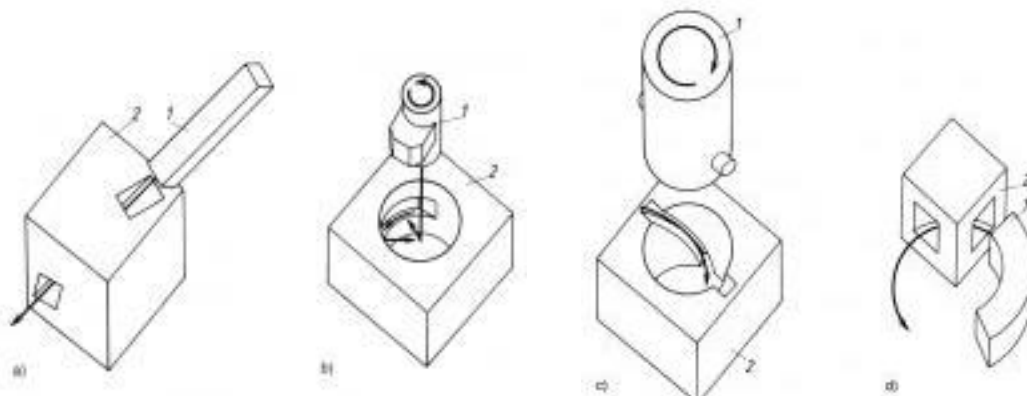
Elektroerozivní obrábění je jedním z moderních postupů obrábění. Tento způsob obrábění nám přináší značné výhody a usnadňuje práci v technologii výroby složitých tvarů, které by konvenčními metodami byly těžko výrobitelné nebo dokonce nevyrobitelné. Proto je použití elektroerozivního obrábění tak rozšířené. Nejvíce se tato metoda obrábění využívá v nástrojárnách při výrobě lisovacích forem na sklo, plasty a lehké kovy nebo při výrobě složitých stíhových pípravků. Elektroerozivní obrábění se také dále využívá tam, kde konstrukce strojních součástí neumožňuje použít jinou metodu nebo tam, kde se používají těžkoobrobitelné materiály, oároveň, oáruvzdorné, vysokopevnostní i tepelně zpracované materiály.

Výhody elektroerozivního obrábění:

- obrábění těžkoobrobitelných materiálů. nezáleží na obrobitelnosti materiálu, na jejich mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost), ale pouze na elektrické vodivosti obráběného materiálu,
- obrábění složitých tvarů. obrobení ostrých rohů i speciálních tvarů, které nelze vyrobit konvenčním způsobem viz obr. 2.2,
- vzniká specifický povrch. využívá se k zdrsňování povrchu, vzniká speciální povrch, který se využívá u vstřikovacích forem.

Nevýhody elektroerozivního obrábění:

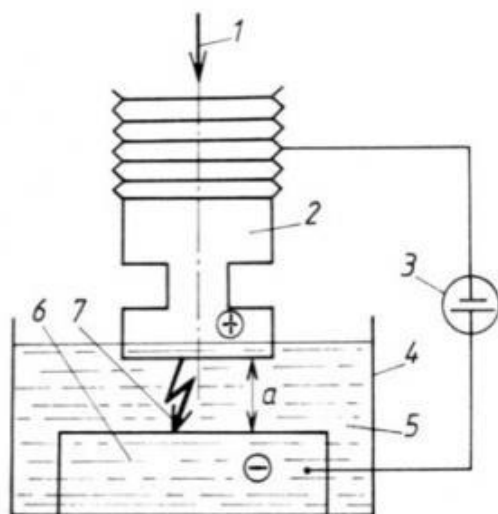
- nutnost vytvořit nástrojovou elektrodu. prodráží se obrábění a v nichž případech je nutno vyrobit elektrody více,
- delší obrábění čas oproti konvenčním metodám obrábění,
- obrábění pouze vodivých materiálů,
- obrobek a elektroda musí být v dielektriku.



1) elektroda, 2) obrobek a) pro chozí nekruhová díra, b) uzavřená dráčka, c) dráčka ve zroubovici, d) díra tvaru části kruhového oblouku
Obr. 2.2 Výroba tvar kombinací pohyb nástrojové elektrody [2]

2.4 Princip elektroerozivního obrábění

Podstatou elektroerozivního obrábění jsou elektrické výboje mezi dvěma elektrodami, kde jedna představuje obrobek a druhá je nástroj. Mezi obrobkem a nástrojem je vysoká koncentrace energie $10^5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ až $10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ [2]. Mezi těmito elektrodami je izolující tekutina s vysokým elektrickým odporem tzv. dielektrikum, kterým nejčastěji bývá petrolej, transformátorový olej, destilovaná voda. Dielektrikum má za úkol izolovat od sebe obě elektrody, tak aby nedošlo k nekontrolovanému zkratu. K obrobku a nástroji je přiveden stejnosměrný proud z generátoru. Obrobek je nejčastěji upevněn pomocí magnetického stolu, případně upínek. Nástrojová elektroda je připevněna v držáku stroje pomocí kleztiny.



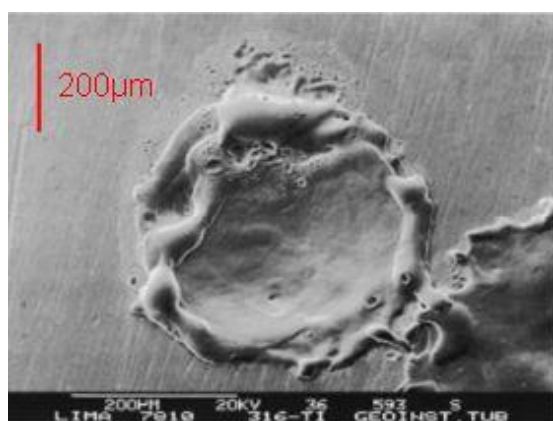
1) směr posuvu nástrojové elektrody
2) nástrojová elektroda, 3) generátor,
4) pracovní vana, 5) tekuté dielektrikum, 6) obrobek, 7) elektrický výboj

Obr. 2.3 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [2]

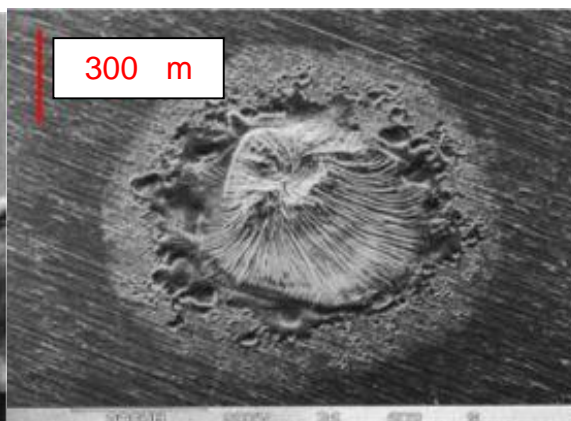
Elektroda se přiblížuje k obrobku, přímě dielektrikum zajišťuje, aby nevznikl náhodný elektrický výboj. Když je prázdná hodnota vztí elektrický odpor dielektrika, dojde k proražení izolační vrstvy a vznikne napávané vodivé pole, v kterém nastane elektrický výboj mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. Hlavními faktory ovlivňujícími proudové proražení jsou vzdálenost obrobku a nástrojové elektrody a velikost proudu. Další vlivy na proražení izolační vrstvy dielektrika jsou vodivost dielektrika a jeho znečištění. Tento vliv se může objevit hem obrábění mnit a může způsobit změnu podmínek obrábění v jeho průběhu.

V elektrickém napávaném poli mezi elektrodami se uvolní do pohybu volné ionty, jak kladné tak i záporné, a nabývají vysoké rychlosti. Tím se vytvoří napávané pole a za ním vznikají elektrické výboje. Výboje se přeměňují na teplo a místo dopadu výboje se velmi silně ohřeje, způsobí tavení a následné odpaření obráběného materiálu. Tyto výboje vznikají vždy na nejmenší vzdálenosti mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou.

Teplota lokálního ohřevu je 3000 °C . 12000 °C [1]. V důsledku takto vysoké lokální teploty dochází i k lokálnímu odpařování dielektrika a ke vzniku plynových bublin. Elektrický výboj trvá v závislosti na nastavení generátoru v řádu desetin sekund. Po obrábění vznikají krátery, jejichž rozměry závisí na velikosti výboje a na obráběném materiálu. Obrázek 2.4 zachycuje kráter v nástrojové oceli. Na krajích je patrná tepelně ovlivněná oblast. Na obrázku 2.5 je kráter při obrábění titanu. Struktura vznikla z důvodu vypařování titanu a rychlým chladnutím.

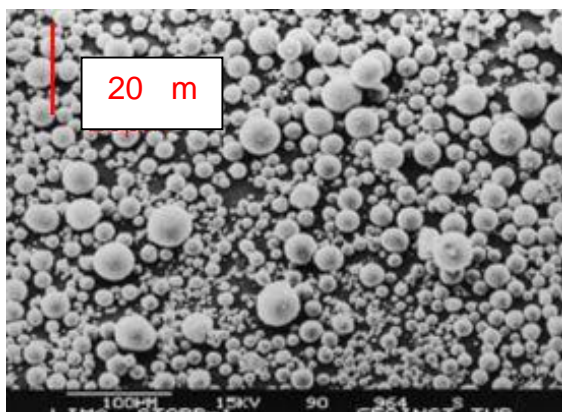


Obr. 2.4 Kráter po výboji v nástrojové oceli [3]

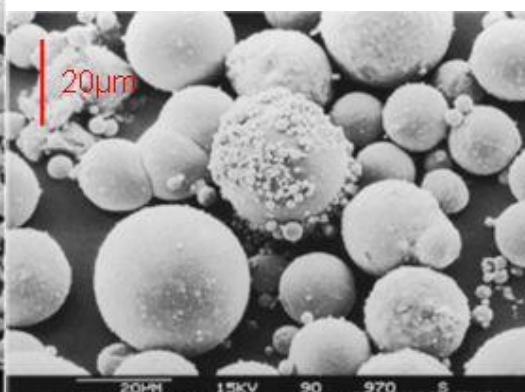


Obr. 2.5 Kráter po výboji v titanu [3]

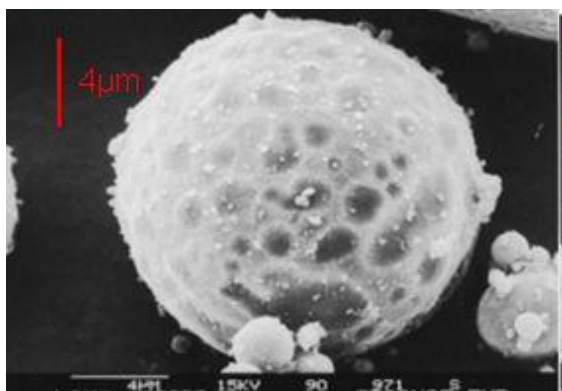
Do prostoru výboje vniká dielektrikum, které vyplavuje roztavený materiál z prostoru výboje ve formě drobných částek obr. 2.6. Některé částice jsou spečené viz obr. 2.7 a povrch částek může být zvrásněný obr. 2.8. Kvůli rychlé kontrakci, k níž dochází po evakuaci u nástrojové oceli, vznikají i duté částice s ostrou hranou obr. 2.9.



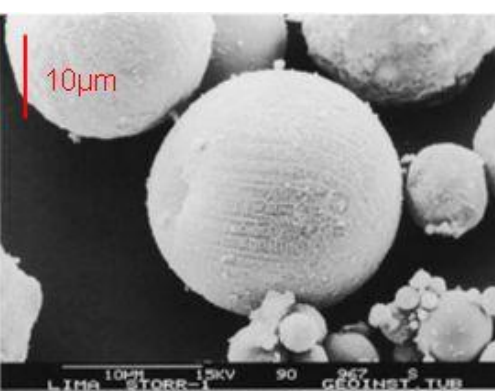
Obr. 2.6 Zbytky erodovaného materiálu umyté v acetonu [3]



Obr. 2.7 Spečené částice [3]



Obr. 2.8 Povrch jednotlivé částice [3]



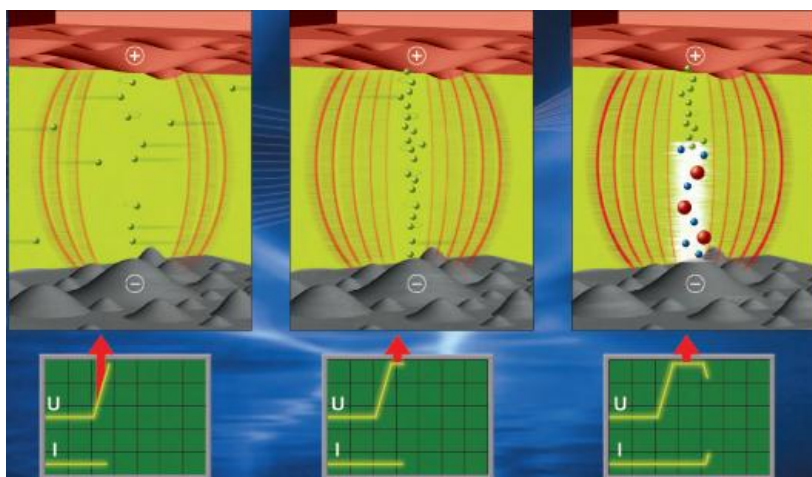
Obr. 2.9 Dutá částice s ostrou hranou [3]

2.4.1 Detailní popis jednoho obráběcího cyklu

Napětí a výbojový proud, který vzniká mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou, má časový průběh znázorněný na obrázcích 2.10 a 2.18. Horní část ukazuje děj mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, ve spodní části je naznačen průběh proudu a napětí.

Napětí vytváří v celém elektrodovém meziprostoru elektrické pole obr. 2.10. Pod vlivem síly tohoto elektrického pole se v dielektriku koncentrují nestabilní vodivé částice, a to na místech největší intenzity pole, které vzniká na nejmenší

vzdálenosti mezi elektrodou a obrobkem. V tizinou se jedná o vyvážení na elektrod a obrobku. D sledkem je vytvoření nap ového pole obr. 2.11. Následn jsou z negativní elektrody (obrobku) vymrz ovány negativn nabité ástice, ty se v elektrickém nap ovém poli st etávají s neutrálními ásticemi a rozpadají se. Takto vznikají negativn a pozitivn nabité ástice. Proces se lavinovit rozšiřuje obr. 2.12.

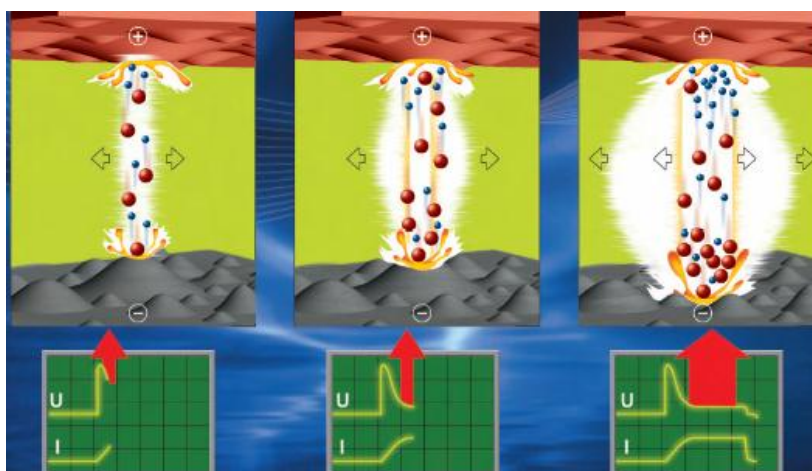


Obr. 2.10

Obr. 2.11

Obr. 2.12

Pozitivn nabité ástice putují k negativní elektrod a negativní ástice k pozitivní obr. 2.13. Tím zesílí protékající elektrický proud a0 k ur ítému maximu, které je stanoveno generátorem, p i em0 teplota a tlak stále stoupá obr. 2.14 a obr. 2.15.

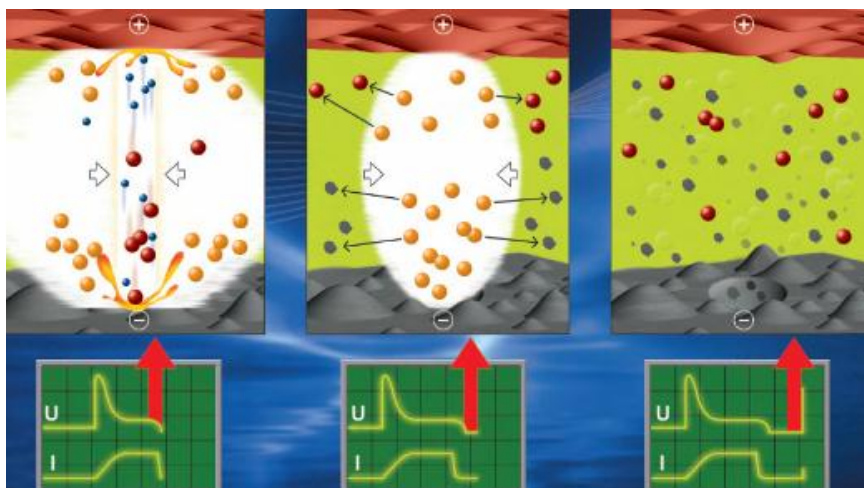


Obr. 2.13

Obr. 2.14

Obr. 2.15

Vytvoří se bublina s plynem, v které se zvyšuje tlak obr. 2.16. Se snížením elektrického proudu, který způsobuje generátor, se redukuje i proud tepla. Po setnutí elektricky nabitých částic rychle klesá a snižuje se i tlak. Současně se snižuje i výbojový kanál a plynová bublina splaskne obr. 2.17. Přehřátá tavenina se odtrhne a zůstane ztuhlá odtržená tavenina, kterou odplaví z místa výboje proud dielektrika. Tento proces se nazývá výplach obr. 2.18. Celý cyklus se opakuje [3].



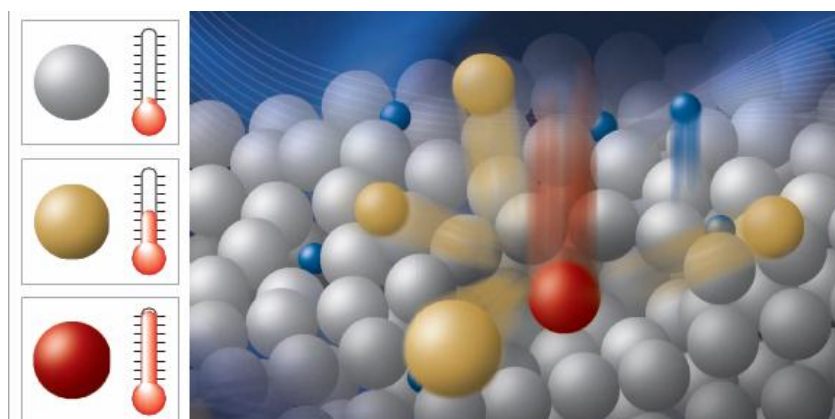
Obr. 2.16

Obr. 2.17

Obr. 2.18

2.4.2 Souvislost mezi proudem a teplem

Na vzájemném vztahu obrázku 2.19 je nakreslen povrch negativně nabitého obrobku a nad ním část výbojového kanálu. Na kovový povrch obrobku dopadají pozitivně nabité částice (červené) a rozkmitávají částice kovu v silnější vibraci, což odpovídá zvýšení teploty. Při překročení určité rychlosti vibrací se vytrhují částice kovu (zčernalé). Spojení pozitivně a negativně nabitých částic má za následek zvýšení vibrací a tím i tepla, jak je znázorněno na levé straně obrázku 2.19.

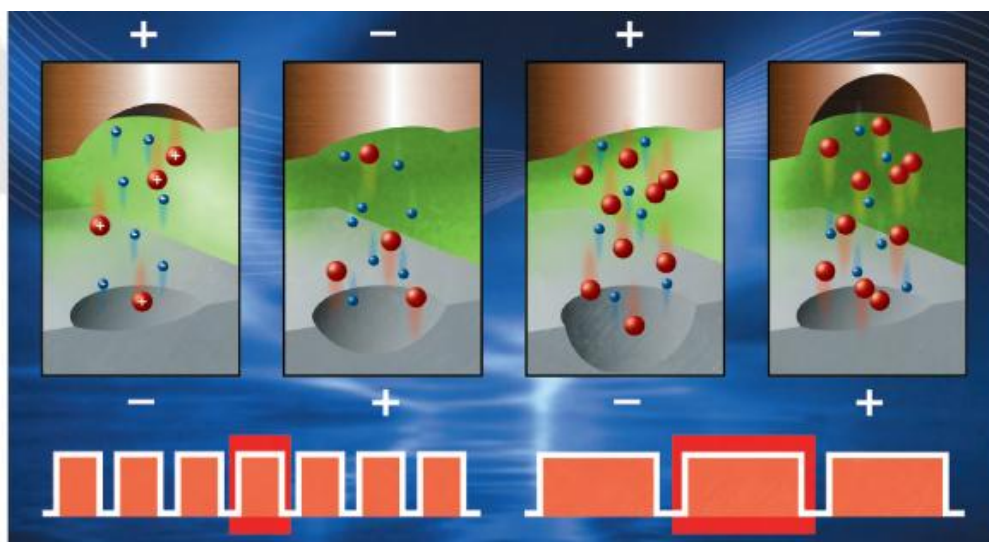


Obr. 2.19 Povrch negativně nabitého obrobku [3]

Elektrická energie takto přeměňuje na teplo nechává výbojový kanál rovný, vede k tvorbě kráterů na obou elektrodách a zvyšuje teplotu dielektrika [3].

2.4.3 Polarita

Obrábění lze provádět i s obrácenou polaritou. V praxi to znamená výměnu plus a mínus na obrobku a na elektrodě, přičemž se samozřejmě vymění částice. Výměnou negativních a pozitivních částic viz obr. 2.20 vzniká ve výbojovém kanálu stejný tok proudu, ale obráceným směrem. Tyto částice také vytvářejí teplo, které vede k tavení kovu, ale na obrácené straně. Při velmi krátké době trvání impulsu je v pohybu více negativně nabitých částic než pozitivně nabitých částic. Na nárazové elektrodě vzniká tím více tepla, čím více částic jednoho druhu se k ní pohybuje. Je důležité, aby pozitivně nabité částice z dielektrika v dířku vytvářely při stejné nárazové rychlosti větší teplo. Aby mohlo opětování na elektrodě zůstat malé, je polarita vybírána tak, aby se na obrobku až do konce výboje uvolnila co možná nejvíce tepelná energie. Při krátkých pulzech se proto nástrojová elektroda nastavuje na mínus. Hovoří se o negativní polaritu. Při dlouhých pulzech se nástrojová elektroda nastavuje na plus, což odpovídá pozitivní polaritu. Trvání impulsu, při kterém se polarita mění, je závislé na několika faktorech, které jsou určovány především fyzikálními vlastnostmi obrobku a nástrojové elektrody [3].



Modré částice - negativní, červené částice - pozitivní

Obr.2.20 Nastavení polarity při obrábění oceli pomocí MDE [3].

2.5 časové využití výboje

časové využití periody výboje q popisuje, jak dlouhý je impulz obrábění v i celkové době trvání jedné periody:

$$q = \frac{t_i}{T} \quad (1)$$

kde:

q – časové využití periody výboje [-],

T – doba periody [s],

t_i – doba trvání impulzu [s].

Tento parametr je významný při stanovování parametrů elektroerozivního obrábění. Další důležité parametry jsou doba impulzu t_i , což je časový úsek mezi spuštěním a vypnutím generátoru. Ve skutečnosti je však doba výboje odlišná. Jde o skutečnou délku výboje. časový interval mezi vypojením a opětovným zapojením generátoru je doba pauzy t_0 . Celková doba periody T je součet doby impulzu a dobou pauzy [4]:

$$T = t_i + t_0 \quad (2)$$

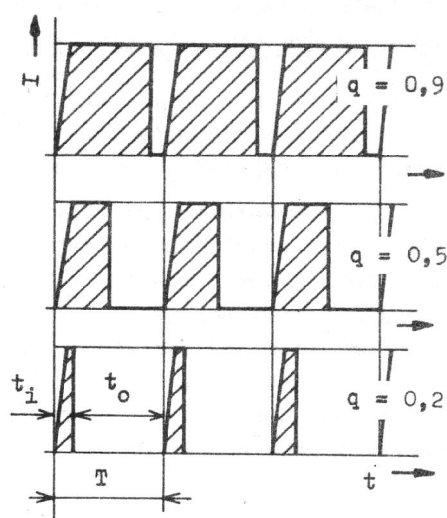
kde:

t_0 – doba trvání pauzy [s].

Po dosazení dostaneme:

$$q = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (3)$$

Schématicky lze časovou periodu výboje znázornit na obrázku 2.21.



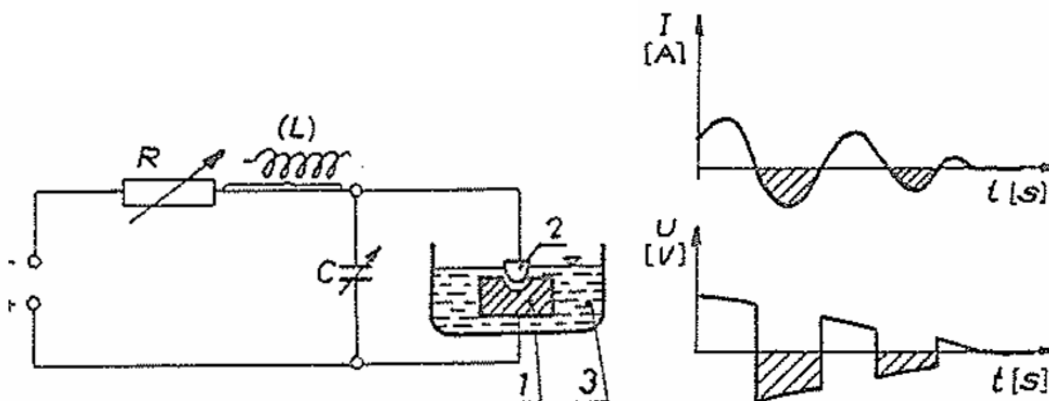
Obr. 2.21 Graficky znázorněný časový průběh elektrického výboje [4]

2.6 Generátory

Generátory jsou zdrojem elektrické energie pro elektroerozivní obrábění. Existují dva druhy generátorů : závislé a nezávislé. [1]

2.6.1 Závislé generátory

Závislé generátory (RC a RLC) jsou označovány jako relaxační. Tyto generátory patří k nejstarším zdrojům výboje.innost generátoru spoívá v opakujícím se nabíjení kondenzátoru přes odpor pomocí stejnosměrného proudu a jeho vybití v pracovní meze, kdy velikost napětí dosáhne prázázové hodnoty. Závislé generátory dávají velmi krátké výboje. Generátory jsou jednoduché a spolehlivé. Nevýhodou je výzší objemový úbytek nástrojové elektrody (30 % i více) způsobený vznikem stídavého proudu se zápornou polárnou. Dále mají omezenou možnost regulovat frekvenci a tvar výboje. Zapojení indukčnosti (L) do nabíjecího obvodu RLC prodlužuje délku výboje a omezuje intenzitu vybíjecího proudu obr. 2.22 [1].



1-obrobek, 2-nástrojová elektroda,
3-dielektrikum, 4-stejnosměrný zdroj

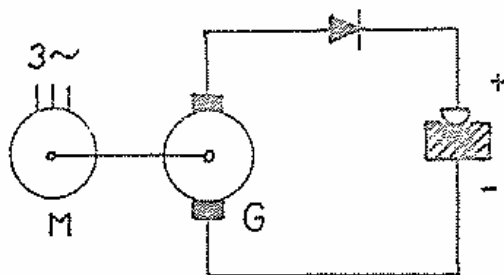
Obr. 2.22 Schéma zapojení RLC generátoru[1]

Obr. 2.23 Prběh proudu a napětí na závislém generátoru[1]

2.6.2. Nezávislé generátory

Nezávislé generátory jsou označovány jako pulsní generátory. Umožují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní meze. Existují dva typy nezávislých generátorů :

1) Rota ní . impulsy vznikají rotací dynama u asynchronního motoru. Obvykle mají stálou frekvenci 400 Hz a umí uží velký úb r. Nevýhodou je jejich vysoká hlou nost a obtíOná regulace frekvence puls .

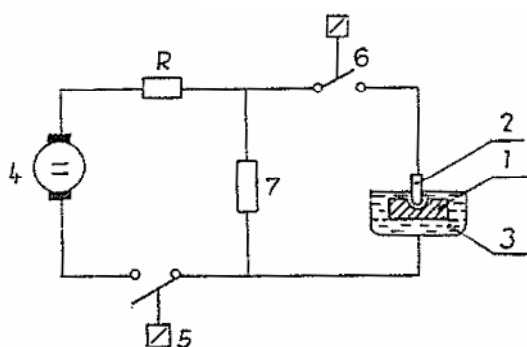


M-asynchronní motor, G-dynamo generátoru

Obr. 2.24 Rota ní generátor[1]

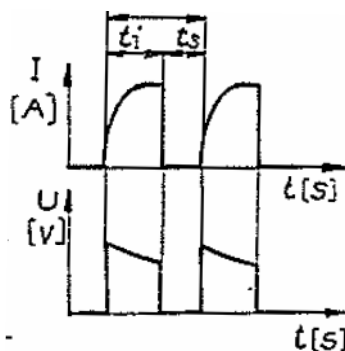
2) Polovodi ové . umí uží zirkou nastavitelnost elektrických parametr . Frekvenci lze mít v rozsahu 0,5 kHz - 50 kHz. Při výbojích nevzniká negativní polarita a je dosažováno relativně malých objemových úbytků nástroje (cca 1%). Charakteristická je delší doba trvání pulsu a převažuje iontová vodivost, proto se obrobek zapojuje jako katoda.

Moderní CNC stroje jsou vybaveny polovodi ovými impulsními generátory, které jsou plně automaticky řízeny podle požadovaných technologických parametr . [1]



1-obrobek, 2-nástrojová elektroda, 3-dielektrikum, 4-stojírný zdroj, 5-vypínač sledu impulsů, 6-vypínač délky impulsu, 7-akumulátor energie

Obr. 2.25 Polovodi ový generátor[1]



Obr. 2.26 Průběh proudu a napětí na polovodi ovém generátoru [1]

2.7 Dielektrikum

Je pracovní prostředí, nejčastěji kapalina, v němž probíhá elektroerozivní proces.

2.7.1 Historie dielektrika

Pro vodní dielektrikum používané při elektroerozivním obrábění byl vzduch. Toto dielektrikum však bylo pro přesný úběr zcela nevhodné a bylo možné jej využít pouze při odstraňování zlomených nástrojů během vrtání a řezání závitů, které je nutno odstranit z nepracujících dílů a nevyžaduje žádné přesnosti.

Následně se začaly používat dielektrika na bázi petroleje, neionizovaná voda, strojního oleje, transformátorového oleje a speciální dielektrika dodávaná výrobcem strojů. Tato speciální dielektrika se vyznačují tím, že neobsahují aromatické složky [3].

2.7.2 Úkol dielektrika

Hlavním úkolem dielektrika je izolovat obráběcí elektrodu a obrobek tak, aby výboj vznikl při co nejmenší jiskrové meze a tím došlo k přesnějšímu obrábění.

Dále musí být dobrá ionizace, neboli co nejrychlejší vytvoření podmínek pro vznik elektrického pole, a musí umožňovat vznik výboje. Na konci impulsu musí být výbojový kanál rychle odionizován, aby mohlo dojít k dalšímu výboji.

Jelikož při elektroerozivním obrábění vzniká vysoká teplota je zapotřebí jak obrobek, tak nástrojovou elektrodu ochlazovat. Musí být zabráneno přehřátí elektrody, tak aby nedocházelo k nadměrnému vysokému opotřebení, a aby se nezměnila tepelným vlivem geometrie, tvar a rozměry obráběné elektrody.

Vznikající částice po obrábění je nutno odstranit, což zajistí proudící dielektrikum, které odnáší částice z místa elektrické eroze [3].

2.7.3 Požadavky na dielektrikum

Obecně je nutné říci, že není třeba vyvinout produkt, který dosahuje v něm kterém z níže jmenovaných kritérií skvělých výsledků. Důležité je, aby používaný produkt dosahoval optimální úroveň ve všech oblastech.

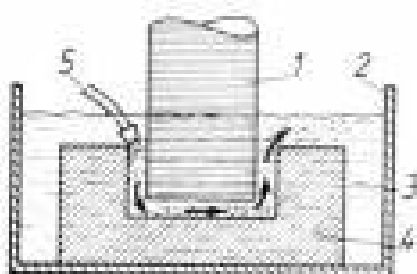
- 1) Elektrický odpor dielektrika . musí být konstantní, aby udržel elektrický výboj a k přerazu výboje docházelo vždy za stejných podmínek.

- 2) Bod vzplanutí musí být minimálně 60°C . jelikož při výbojích vznikají vysoké teploty, které ohřívají nástrojovou elektrodu, obrobek a také dielektrikum
- 3) Hygieničnost - dielektrikum nesmí být jedovaté (toxické), nesmí být dráždivé při styku s pokožkou a při působení tepla nesmí vznikat zápach.
- 4) Ekologická nezávadnost - dielektrikum se nesmí rozkládat a způsobovat vznik nebezpečných plynů.
- 5) Nízké provozní náklady.
- 6) Filtrovatelnost - dielektrikum musí být snadno a jednoduše filtrovatelné, čímž se prodloužuje životnost [3].

2.8 Způsob výplach

Dle této vlastnosti dielektrika je vyplavování roztaveného materiálu z prostoru výboje ve formě drobných částek. Existuje několik možných způsobů výplachu.

1) Vnitřní vyplachování obr. 2.27 . je jedním z nejčastějších způsobů vyplachování. Nevyžaduje žádné speciální (duté) nástrojové elektrody či otvory v obrobku. Podmínkou je dobré nastavení směru proudění dielektrika - například při hloubení nebo vrtem je nevhodné umístit výplach kolmo ve směru řezání, ale je nutné ho umístit podél směru řezání. Při použití více výplachů je zapotřebí dát pozor, aby proudy výplachu nesměřovaly proti sobě a tím nedocházelo k hromadění zbytků obráběného materiálu mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. [2]

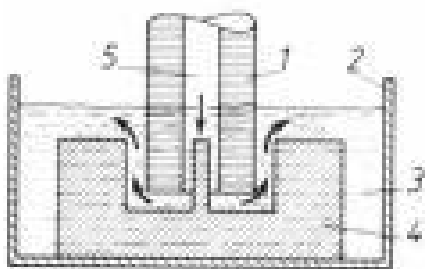


1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 5-přívod dielektrika

Obr. 2.27 Vnitřní vyplachování[2]

2) Tlakové vyplachování vnitřní obr.2.28 . při tomto způsobu vyplachování je dielektrikum vháněno do místa obrábění buď shora vrtem v elektrodě, nebo zespodu obrobkem. Rozhodující pro účinnost vymývání je průtokové množství,

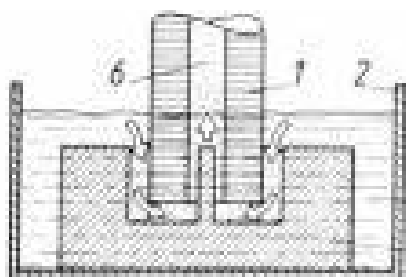
mén potom tlak. Tento způsob se často využívá k obrábění hlubokých dír, při němž se jako nástrojová elektroda používá trubka.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 5-přívod dielektrika

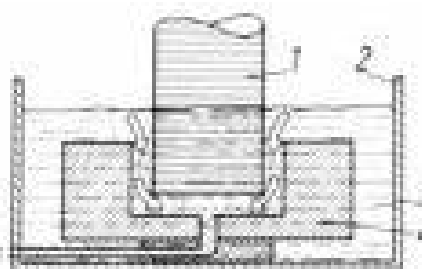
Obr. 2.28 Tlakové vyplachování vnitřní[2]

3) Vyplachování odsáváním - pomocí elektrody obr. 2.29 nebo pomocí obrobku obr. 2.30. Jedná se o vhodný způsob pro výplach, pokud je pod místem obrábění otvor, například otvor pro vyhazovací pin ve vstřikovací formě. V případě tohoto výplachu jsou částice z mezery odsávány. Tato metoda se doporučuje především tam, kde je potřeba dosáhnout jemného konečného opracování a rovnoběžných stěn obrobku. V případě úzkých pracovních mezer je pro zajištění stability obráběcího procesu nutné dbát, aby se dostatečné množství dielektrika dostalo do mezery.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

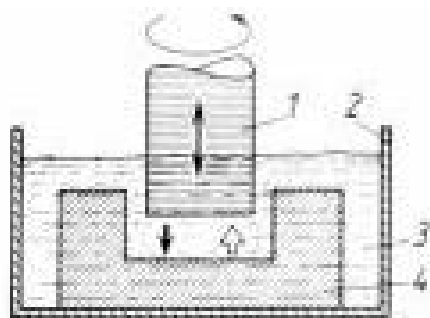
Obr. 2.29 Odsávání pomocí elektrody[2]



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

Obr. 2.30 Odsávání pomocí obrobku[2]

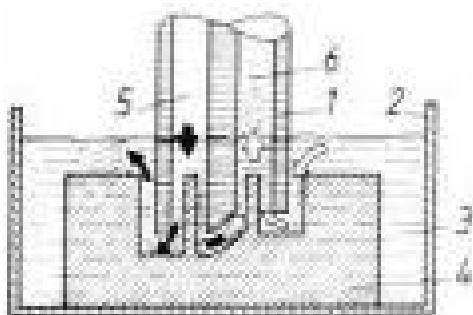
4) Pulzní výplach obr. 2.31 - je charakterizován přerušením procesu elektroeroze na 0,15 s až 10 s a současným vyjetím nástrojové elektrody z hloubeného místa o 0,02 mm až 10 mm, čímž se zvětší pracovní mezera mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou a docílí se vypláchnutí. Tento způsob je vhodný při výrobě hlubokých dutin za použití tenkých elektrod. Pulzní výplach lze i naprogramovat.



1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek,

Obr. 2.31 Pulzní výplach[2]

5) Kombinovaný výplach obr. 2.32 . jedná se o kombinaci odsávání a tlakového vyplachování, případně o vnější vyplachování. Používá se zejména u hloubení hlubokých dutin složitých tvarů a tvarů s vysokou přesností. [2]

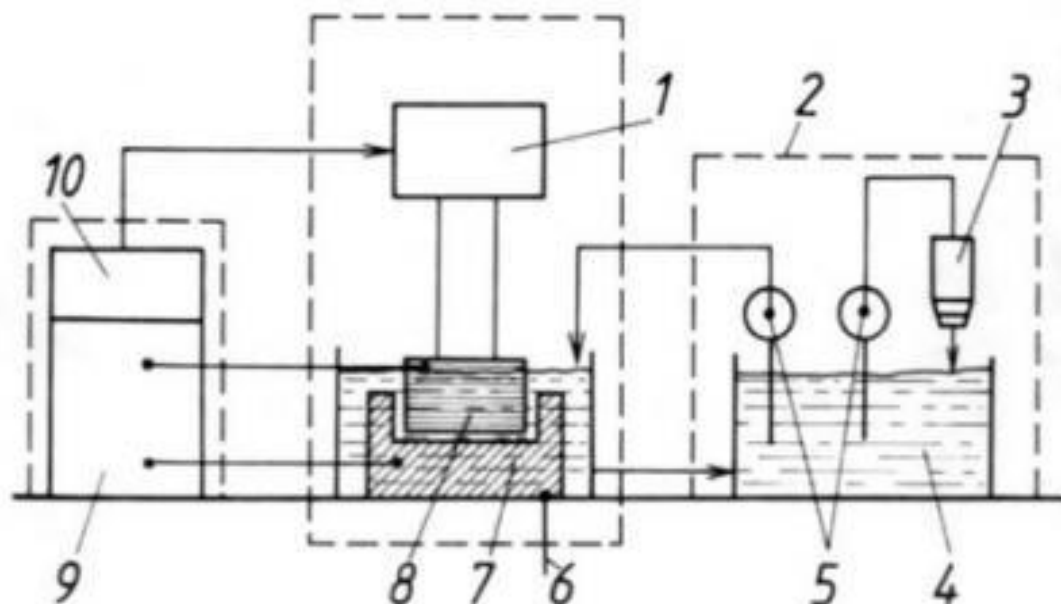


1-nástrojová elektroda, 2-pracovní vana, 3-dielektrikum, 4-obrobek, 6-odsávání dielektrika

Obr. 2.32 Kombinovaný výplach[2]

2.9 Stroje pro elektroerozivního obrábění

Na obrázku 2.33 je znázorněno schéma elektroerozivního stroje a na obrázku 2.34 je snímek stroje v reálném provedení [2].



1 . pracovní hlava, 2 . filtrační zařízení, 3 . filtr, 4 . dielektrikum, 5 . čerpadlo, 6 . pracovní stůl, 7 . obrobek, 8 . nástrojová elektroda, 9 . generátor, 10 . CNC řídicí systém

Obr. 2.33 Schéma elektroerozivního stroje[2]

Moderní hloubicí stroje mají všechny funkce řízeny systémem CNC, řízení polohy stolu, směru a rychlosti pohybu. Samozřejmostí je plně automatické řízení výměny nástrojových elektrod. V některých podnicích je polotovar nástrojové elektrody umístěn do speciálního držáku a upnut do obráběcího centra, kde je z polotovaru vyrobena nástrojová elektroda. Takto vyrobené nástrojové elektrody jsou spolu s držákem umístěny do zásobníku nástrojových elektrod a následně jsou nástrojové elektrody používány k obrábění v elektroerozivním stroji. Tento postup výrazně usnadňuje nasazování elektrod do stroje a tím zvyšuje efektivitu celého procesu obrábění. Takto lze bezobsluhu nechat stroj pracovat nepřetržitě několik desítek hodin.



Obr. 2.34 Elektroerozivní obráběcí stroj (hloubička) Exeron 314 [2]

Řídicí systémy CNC umožňují snadné naprogramování stroje s pomocí nastavenými technologiemi pro obrábění různých materiálů, případně vytvářet vlastní programy a modifikovat předem definované programy.[2]

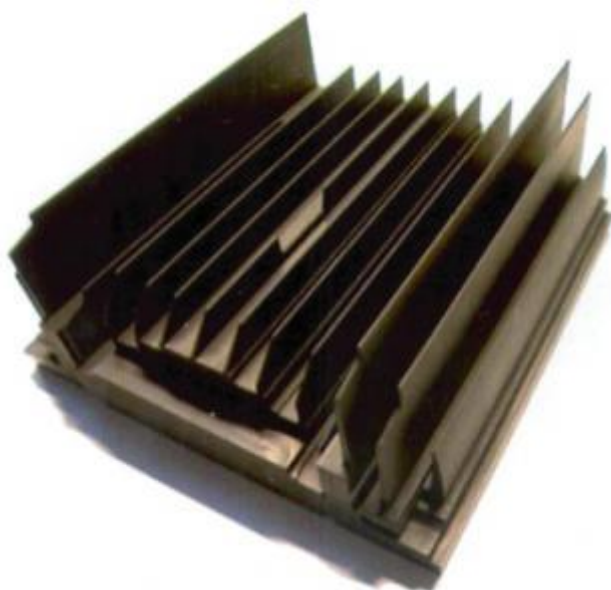
2.10 Nástrojové elektrody

Nástroje pro elektroerozivní obrábění jsou tzv. nástrojové elektrody. Nástrojové elektrody jsou připravovány pro konkrétní tvar a pro konkrétní obrábění samostatně. Výroba elektrod tvoří značný podíl na celkové ceně hloubeného dílu. Náklady na zhotovení činí až 50 % z celkových nákladů, proto je nutno dobře zvolit materiál a způsob výroby.

Z hlediska materiálu můžeme rozdělit nástrojové elektrody na elektrody kovové, jejichž materiálem je například slitina wolframu a manganu, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a manganu, mosaz, a elektrody nekovové, u nichž se využívá grafit. Těto skupinu tvoří tzv. kombinované elektrody neboli elektrody z kompozice grafitu a manganu [2].

Materiál nástrojové elektrody by měl mít následující vlastnosti:

- odolnost proti elektrické erozi,
- dobrou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu,
- vysoký bod tání,
- vhodnou mechanickou pevnost,
- tvarovou stálost,
- dobrou obrobiteľnosť.



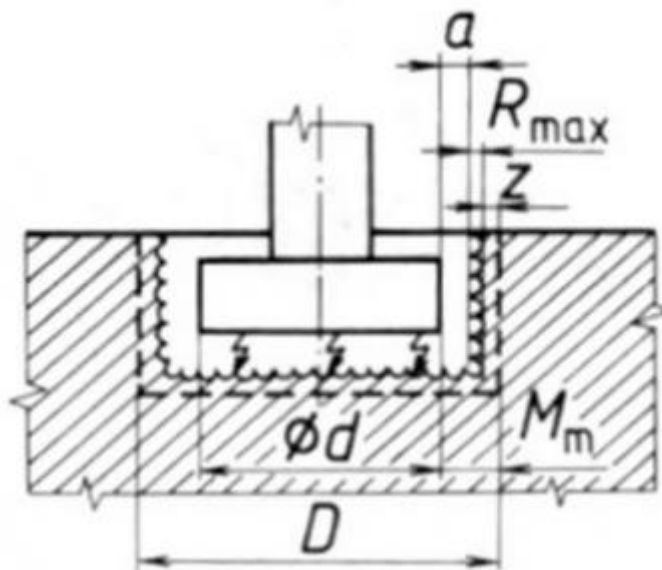
*Obr. 2.35 Nástrojová elektroda .
Elektroda vyrobená z grafitu [2]*

Rozměr a tvar nástrojové elektrody je podmíněn především tvarem požadované dutiny, která je zmenšena o projisknutí (anglicky GAP). Toto projisknutí je dáno materiálem elektrody, materiálem obrobku, generátorem a požadavkem na povrch.

Elektrody se dále rozlišují na hrubovací a dokončovací. Hrubovací elektroda slouží k hrubování požadovaného tvaru a nejsou na ni kladeny tak vysoké požadavky vzhledem k tvaru a kvalitě povrchu. Výpočet rozměru kruhové elektrody je dán vztahem [2]:

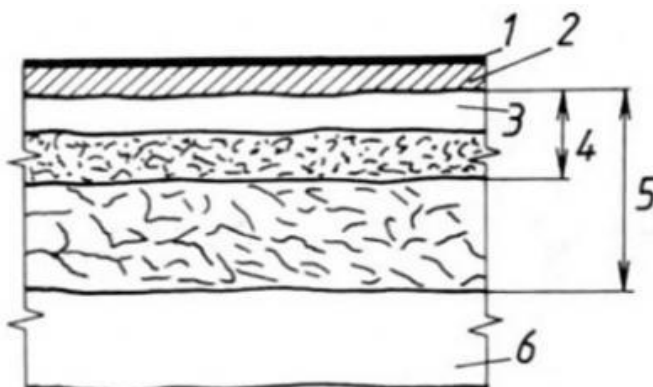
$$d = D - 2 \cdot (a + R_{\max} + z) = d - 2 \cdot M_m \quad (4)$$

kde: d – průměr nástrojové elektrody,
 D – požadovaný rozměr dutiny,
 A – velikosti pracovní mezery (GAP),
 R_{\max} – požadovaná drsnost obrobeného povrchu,
 Z – tloušťka naružené vrstvy,
 M_m – minimální hodnota, o kterou musí být hrubovací nástrojová elektroda menší, pro dosažení průměru dutiny.



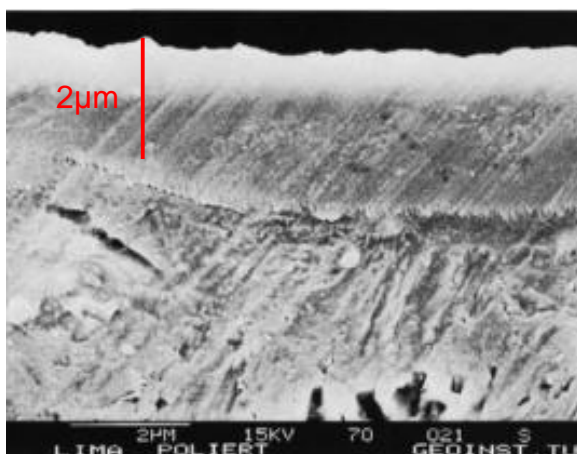
Obr. 2.36 Rozměry kruhové hrubovací elektrody [2]

Při hrubování může vznikat tzv. bílá vrstva, což je narušená vrstva po hrubování vysokými proudy. Narušení je do tloušťky 0.01 mm a je eliminováno dokonovací elektrodou. Po dokonovacím obrábění je tloušťka bílé vrstvy do 2 μm viz obr. 2.38.



1. mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difúzí prvků dielektrika, 2. vrstva obsahující prvky materiálu nástrojové elektrody, 3. tzv. bílá vrstva (silně narušená znovu ztuhlá tavenina martenzitické struktury), 4. pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný základní materiál obrobku), 5. pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzu, 6. základní materiál obrobku

Obr. 2.37 Složení povrchu opracované plochy (bílá vrstva) [2]



Obr. 2.38 Bílá vrstva po dokonovacím obrábění [3]

U dokonovací elektrody je mimo jiné kladen velký důraz na tvar a kvalitu jejího povrchu. Výpočet rozměru dokonovací elektrody:

$$d_{fin} = D - 2 \cdot a \quad (5)$$

kde: d_{fin} ... průměr dokonovací elektrody [mm],
 D ... požadovaný rozměr výrobku [mm],
 a ... velikost pracovní mezery [mm].

3. Metodika

3.1 Metodika experimentu

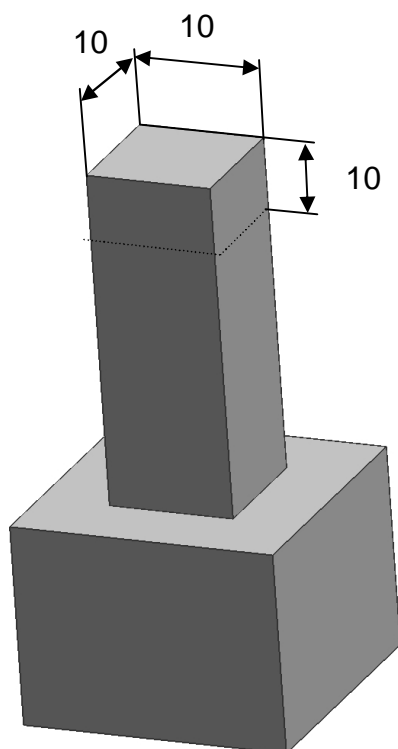
Experimenty byly vybrány tak, aby se co nejvíce podobaly reálné situaci hloubení ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. a zároveň byla zajištěna jednoduchá měřitelnost celního opotřebení nástrojových elektrod.

Z tohoto důvodu byl zvolen jednoduchý tvar elektrody a objem obráběného materiálu, který se pohybuje v řádu 1 cm^3 .

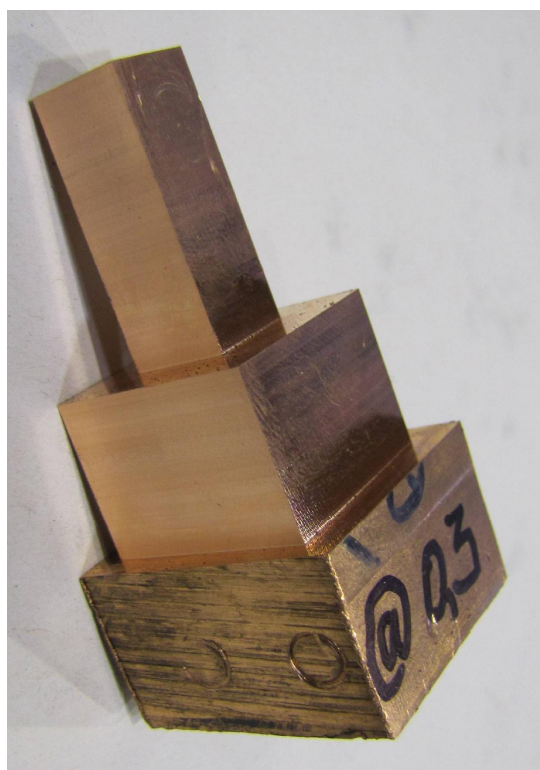
3.2 Elektrody pro experiment

U elektrod pro experiment byl zvolen takový tvar elektrody, který odpovídá nejčastěji používanému tvaru a hloubce úběru v praxi, přičemž z tohoto tvaru bude možné zjistit opotřebení nástrojové elektrody a drsnost povrchu.

Jedná se o čtvercový tvar elektrody s plochou 100 mm^2 a délkou jiných částí 10 mm.



Obr. 3.1 3D model elektrody pro test hloubení



Obr. 3.2 Elektroda pro test hloubení, měřidlo

3.2.1 Materiály pro nástrojové elektrody

Na nástrojové elektrody budou použity tyto materiály.

M je používána ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.,

Grafit EDM-1 - grafit s ultra jemnou zrnitostí, vhodný pro hrubovací i dokončovací operace. Je odolný v i opotřebení, umožňuje vysokou rychlost obrábění a jemné opracování povrchu dutiny. Uplatňuje se zejména při hloubení 0eber. Dobře se frézuje a leže na drátozdu

Grafit EDM-200 - izotropní super jemný grafit s dobrou pevností, odolností proti opotřebení a možnostmi jemného opracování povrchu. Velmi dobře se frézuje. Uplatňuje se při obrábění složitých tvarů, například sítě 0eber. Dodává se v blocích a proužcích.

Grafit EDM-C200 - jemný grafit s vysokou hustotou sycený manganem. Snadno se frézuje a leže na drátozdu. Vhodný zejména k obrábění speciálních kovů a slitin. Umožňuje redukovat počet elektrod. Má vynikající vlastnosti při úběru kovu a je odolný v i opotřebení.

Grafit EDM-C3 - vysoce hutný grafit sycený manganem. Snadno se frézuje a leže na drátozdu. Uplatňuje se při obrábění slitin s obsahem manganu. Správné použití umožňuje redukovat počet elektrod. Materiál splňuje požadavky na jejich opotřebení, úběr kovu a jakost povrchu [5].

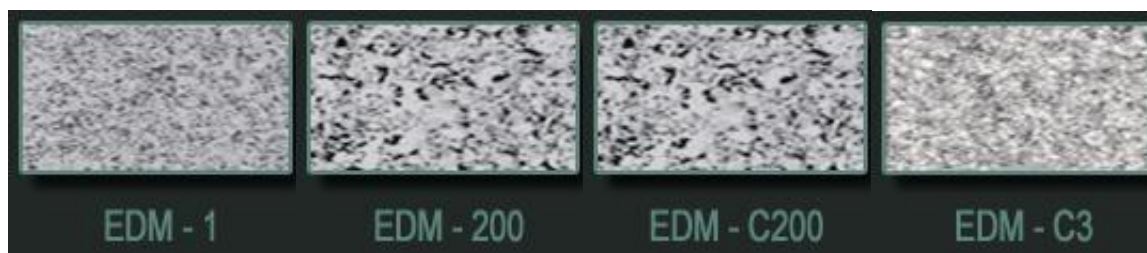
Mangané elektrody byly vybrány, jelikož se v současné době používají ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Materiál pro elektroerozivní obrábění dodává firma Car Well Trade, s.r.o..

Grafitové elektrody byly doporučeny firmou Tedok s.r.o. jako alternativa k nahrazení manganých elektrod. Vlastnosti grafitu dodávaného touto firmou jsou uvedeny v tab. 3.1

Název	Velikost částic [μm]	Pevnost v ohybu [kg.cm ⁻²]	Pevnost v tlaku [kg.cm ⁻²]	Tvrdost [Shore]	Měrný el. odpor [Ω.m]
EDM - 1	do 5	682	998	69	19,3
EDM - 200	do 10	569	984	68	14,7
EDM - 200	do 10	851	1631	62	2,9
EDM - C3	do 5	1427	1993	66	3,2

Tab.3.1 Vlastnosti grafitu [5]

Na obrázku 3.3 je znázorněna mikrostruktura materiálů EDM-1, EDM-200, EDM-C200 a EDM-C3.



Obr. 3.3 Mikrostruktura jednotlivých materiálů z grafitu [5]

V tabulce 3.2 je soupis všech elektrod použitých jak pro samotný experiment, tak opakovatelnost experimentu.

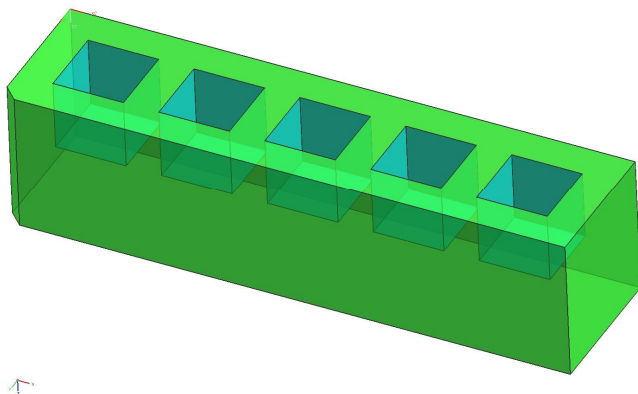
Druh testu	Materiál	Počet kusů	
		Hrubovací	Dokončovací
Opakovatelnost experimentu	Cu	5	5
Experiment	Cu	2	2
	EDM-1	2	2
	EDM-200	2	2
	EDM-C3	2	2
	EDM-C200	2	2

Tab. 3.2 Soupis elektrod pro experiment

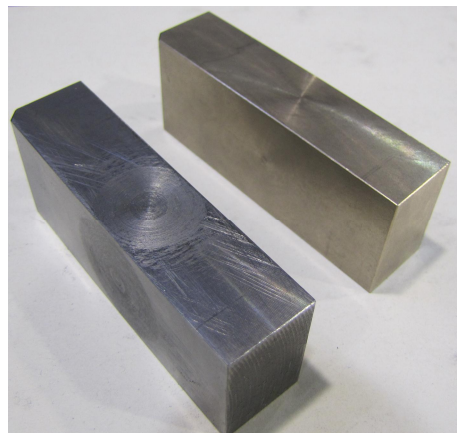
3.3 Obrábění materiálu pro experiment

Pro samotný experiment budou připraveny dva polotovary z tohoto materiálu: nástrojová ocel (HPM7) a materiál MoldMAX® V. Pro opakovatelnost experimentu bude připraven ten samý polotovár z materiálu MoldMAX® V.

Polotovár, na kterém bude experiment prováděn, je výrobek speciálně navržený pro tento experiment obr. 3.4.



Obr 3.4 3D model výrobku pro experiment



Vlevo HPM7 vpravo MoldMAX® V
Obr 3.5 Polotovar pro experiment.

V tabulce 3.3 je soupis vzech obráběných materiálů pro experiment.

Druh testu	Materiál	Počet kus
Opakovatelnost experimentu	MoldMAX® V	1
Experiment	MoldMAX® V	1
	HPM7	1

Tab 3.3 Soupis obráběných materiálů

3.4 Strojní vybavení experimentu

Strojní vybavení, na němž budou prováděny experimenty a měření:

- 1) Roboform 23 P- hloubička, na které budou prováděny všechny experimenty. Velikost obráběcího prostoru 739 mm x 450 mm x 270 mm. Max hmotnost obrobku 180 kg, maximální hmotnost nástrojové elektrody 50 kg. Typ generátoru pulzní 32A,



Obr 3.6 Roboform 23 P [11]

- 2) Deckel Maho DMU 60T - CNC frézka, která je p izp sobena výrob grafitových elektrod,
- 3) Deckel Maho DMU 125T hi-dyn . CNC frézka, na které se budou vyráb t m d né elektrody,
- 4) Intos FNGJ50 . nástrojá ská frézka, na které bude vyráb n polotovar pro hloubení,
- 5) Keyence Digital Microscope VHX-600 . mikroskop s 50-tinásobným zv tzením,
- 6) Mitutoyo SJ-400 . p ístroj na m ení drsnosti.

3.5 Opakovatelnost experimentu

Vzhledem k asové a finan ní náro nosti experimentu nebylo možné opakovat n kolikrát všechny experimenty tak, aby byla zachována jejich objektivnost. Proto bylo provedeno ur ení úrovn spolehlivosti na jednom experimentu. Jako podklad pro úrove spolehlivosti byla pou0ita norma SN ISO 8688-1. Stupe významnosti byl zvolen **dost významný**, co0 odpovídá úrovni spolehlivosti 99 % [6].

Za testovaný materiál pro opakovatelnost testu byla vybrána m jako nástrojová elektroda. Z obráb ného materiálu byl vybrán materiál MoldMAX® V.

D vody pro výb r t chto dvou materiál byly následující. Materiál MoldMAX® V byl vybrán, jeliko0 jeho obráb ní pomocí m di nebylo v 0ádném technologickém nastavení stroje k dispozici. Toto nastavení se provád lo ru n pouze na základ dosavadních poznatk specialisty na elektroerozivní obráb ní v DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. Z t chto d vod se p edpokládá, 0e výsledky tohoto obráb ní budou nejmén stabilní.

Pro výpo et opakovatelnosti experimentu je nutné vypo ítat pr m rnou hodnotu \bar{x} a sm rodatnou odchylku s jak pro dobu obráb ní, tak pro opot ebení elektrody.

Pr m rné hodnoty opot ebení x_{op} se dosáhne d lením sou tu výsledk v ka0dé zkouzce.

$$x_{op} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i_op}}{n} \quad (6)$$

kde: x_{op} – aritmetický průměr opotebení nástrojové elektrody [mm],

x_{i_op} – jednotlivé hodnoty opotebení nástrojové elektrody [mm],
 n – počet měření.

Pro výpočet průměrného času obrábění x_{cas} se použije podobný vzorec.

$$x_{cas} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i_cas}}{n} \quad (7)$$

kde: x_{cas} – průměrný čas obrábění [min],
 x_{i_cas} – jednotlivá měření času obrábění [min].

Dále spočítáme směrodatnou odchylku s_{cas} pro dobu obrábění.

$$s_{cas} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i_cas} - x_{cas})^2}{n-1}} \quad (8)$$

kde: s_{cas} – směrodatná odchylka pro dobu obrábění [min].

Výpočet směrodatné odchylky opotebení:

$$s_{op} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i_op} - x_{op})^2}{n-1}} \quad (9)$$

kde: s_{op} – směrodatná odchylka pro dobu obrábění [-].

Statistický interval spolehlivosti, v jehož rámci budou umístěny výsledky dalšího zkuzebního testu s předpokládanou pravděpodobností pro čas, se vypočítá následovně :

$$x_{\max_cas} = x_{cas} + t_{99} \cdot \frac{s}{n-1} \quad (10)$$

$$x_{\min_cas} = x_{cas} - t_{99} \cdot \frac{s}{n-1} \quad (11)$$

kde: t_{99} je konstanta získaná z tabulky tab. 3.4 pro úroveň spolehlivosti 99% ($t_{99}=4,604$),

x_{\min_cas} ..minimální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experiment, poříteno pro x_{cas} ,

x_{\max_cas} .. maximální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experiment, poříteno pro x_{cas} .

Stupne volnosti (n - 1) alebo (n _A + n _B - 2)	hodnota t		
	Úroveň spoľahlivosti		
	95 %	99 %	99,9 %
1	12,706	63,657	636,5
2	4,302 7	9,925	31,60
3	3,182 5	5,841	12,94
4	2,776 4	4,604	8,610
5	2,570 6	4,032	6,859
6	2,446 9	3,707	5,959
7	2,364 6	3,499	5,405
8	2,306 0	3,355	5,041
9	2,262 2	3,250	4,781
10	2,228 1	3,169	4,587
11	2,201 0	3,106	4,537
12	2,178 8	3,055	4,318
13	2,160 4	3,012	4,221
14	2,144 8	2,977	4,140
15	2,131 5	2,947	4,073
16	2,119 9	2,921	4,015
17	2,109 8	2,898	3,965
18	2,100 9	2,878	3,922
19	2,093 1	2,861	3,883
20	2,086 0		
30	2,042 3		
40	2,021 1		
60	2,000 3		
120	1,979 9		
∞	1,960 0		
Stupeň významnosti	*	**	***
	významný	dosť významný	veľmi významný

Tab.3.4 Studentové hodnoty t pro r zné úrovn spolehlivosti [6]

Pro opot ebení:

$$x_{\max_op} = x_{op} + t_{99} \cdot \frac{s_{op}}{n-1} \quad (12)$$

$$x_{\min_op} = x_{op} - t_{99} \cdot \frac{s_{op}}{n-1} \quad (13)$$

kde : x_{\min_op} .. minimální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experiment , po itáno pro opot ebení,
 x_{\max_op} .. maximální hodnota statistického intervalu, kde bude ležet 99% experiment , po itáno pro opot ebení.

Ov ení, zda existuje podstatný rozdíl mezi m eními, porovnáme pomocí výpo tu t_{skut} a následn porovnáme s hodnotou t_{tab} .

$$t_{skut_cas} = \frac{x_{cas_max} - x_{cas_min}}{\sqrt{\frac{n \cdot s_{cas}^2}{n-1} \cdot \frac{1}{n}}} \quad (14)$$

kde: t_{skut_cas} .. skute ný interval spolehlivosti pro as,
 x_{cas_max} .. maximální hodnota m ení asu,
 x_{cas_min} .. minimální hodnota m ení asu.

$$t_{skut_op} = \frac{x_{op_max} - x_{op_min}}{\sqrt{\frac{n \cdot s_{op}^2}{n-1} \cdot \frac{1}{n}}} \quad (15)$$

kde: t_{skut_op} .. skute ný interval opot ebení pro opot ebení,
 x_{op_max} .. maximální hodnota m ení opot ebení,
 x_{op_min} .. minimální hodnota m ení opot ebení.

Pro opot ebení i dobu obráb ní musí být hodnota t_{skut_op} a hodnota t_{skut_cas} v tží ne0 hodnota v tabulce $t_{99}=4.604$. Pokud bude spln na tato podmínka, opakovatelnost experimentu je v úrovni spolehlivosti v tží ne0 99%.

3.6 Porovnání drsnosti povrchu

Povrch po elektroerozivním obrábění je jiný než po konvenčním obrábění. Konvenčním obráběním zanechává stopy nástroje, kdežto elektroerozivní obrábění zanechává stopy po elektrických výbojích ve tvaru kráterů. Velikost kráteru je závislá na několika veličinách: především na velikosti proudu, délce pulzu a na frekvenci pulzu. Pro dosažení kvalitního povrchu je obecně lepší použít nižší proud a kratší pulzy o vyšší frekvenci. Nevýhodou dokončování při vysoké kvalitě povrchu je značné opotřebení nástrojové elektrody a velmi pomalý úběr.

Jelikož drsnost povrchu je značně odlišná od konvenčního obrábění, nepoužívá se označení ve stupnici R_a , ale používá se vlastní bezrozměrná jednotka VDI. Etalon s řadou drsností dle VDI je na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Etalon s drsnostmi dle VDI

Na obrázku 4.4 je znázorněn etalon dle VDI, který slouží k určení drsnosti povrchu. Povrch se subjektivně porovnává s etalonem. Existuje orientační převodní tabulka, podle níž se dá převést VDI na R_a . viz. obrázek 3.8.

Nr	$R_a \mu m$
0	0,10
3	0,15
6	0,20
9	0,30
12	0,40
15	0,55
18	0,80
21	1,10
24	1,60
27	2,20
30	3,20
33	4,50
36	6,30
39	9,00
42	12,5
45	18,0

Obr. 3.8 Převodní tabulka drsnosti mezi normou VDI a R_a

4. Experimentální část

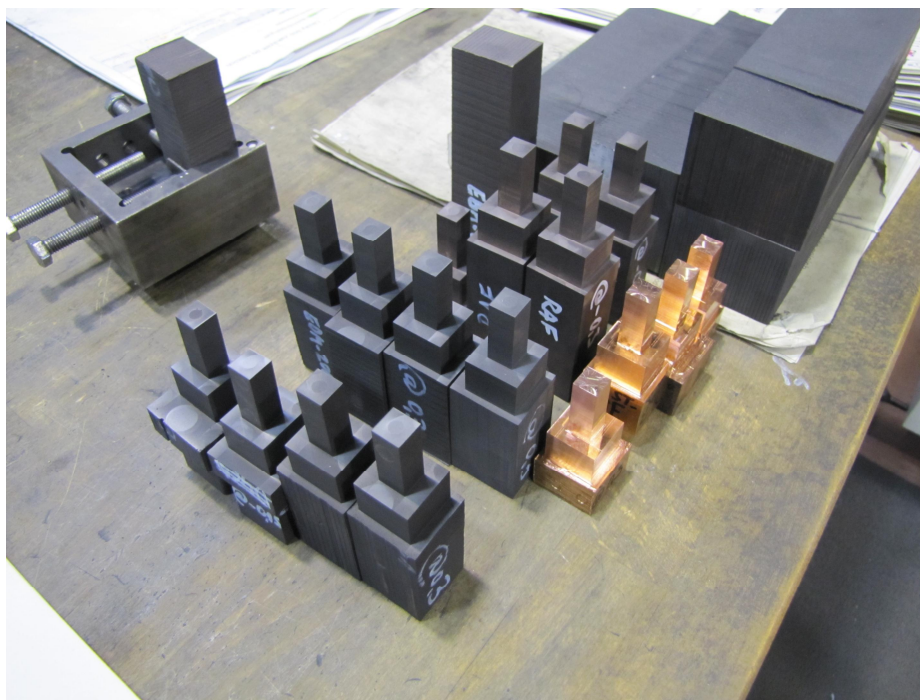
4.1 Příprava experimentu

Příprava na experimenty byla rovněž prováděna ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Přípravné práce u výroby nástrojových elektrod a obrábění materiálu prováděla obsluha jednotlivých strojů.

4.1.1 Výroba elektrod

Elektrody se vyráběly na CNC strojích. Grafitová elektroda na *Deckel MAHO DMU 60T* a manganová elektroda na *Deckel MAHO DMU 125H hi-dyn*.

Programátor připravil program *0734-jirka-CU.wkf* na výrobu elektrod z mědi a program *0734-jirka-GR.wkf* na výrobu elektrod z grafitu. Stejný program byl vytvořen pro hrubovací a dokončovací elektrody pouze s rozdílnou jiskrovou mezerou. Pro všechny druhy grafitu se používá jeden program *0734-jirka-GR.wkf*, proto je proces výroby grafitových elektrod stejný.



Obr.4.1 Výroba elektrod pro experiment

Základní rezné podmínky jsou vypsány v tabulce tab. 4.1 VISI . Machining report.

VISI - Machining Report			
Program: 0734-jirka-CU.wkf			
Operace	Parametr		J
N1	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	4450	s ⁻¹
	posuv	350	mm.s ⁻¹
	Čas	54,2	min
N2	Nástroj	B2NK-12	
	Délka	26	mm
	Otáčky	2200	s ⁻¹
	posuv	150	mm.s ⁻¹
	Čas	25,3	min
N3	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	125	mm.s ⁻¹
	Čas	19,8	min
N4	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	125	mm.s ⁻¹
	Čas	18,5	min
Chlazení: Emulze			
Celkový čas			117,8 min

VISI - Machining Report			
Program: 0734-jirka-GR.wkf			
Operace	Parametr		J
N1	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	4450	s ⁻¹
	posuv	700	mm.s ⁻¹
	Čas	26,3	min
N2	Nástroj	B2NK-12	
	Délka	26	mm
	Otáčky	2200	s ⁻¹
	posuv	300	mm.s ⁻¹
	Čas	11,8	min
N3	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	250	mm.s ⁻¹
	Čas	10,2	min
N4	Nástroj	C4NK-12	
	Délka	36,3	mm
	Otáčky	1250	s ⁻¹
	posuv	250	mm.s ⁻¹
	Čas	9,8	min
Chlazení: Vzduch			
Celkový čas			58,1 min

Tab.4.1 rezné podmínky z VISI . Machining reportu

4.1.2 Obráběný materiál

Obráběný materiál z MoldMAX® V i z nástrojové oceli je vyráběn na nástrojářské fríze podle 2D výkresu, který je součástí přílohy 4. Jde o hranoly 20 mm x 30 mm x 80 mm, které mají z důvodu správné orientace obrobku při následném měření jednu hranu srovnanou 3 x 45°.

Dále jsou připravovány 2 kusy z materiálu MoldMAX® V a 1 kus z nástrojové oceli.

Jeden vzorek z materiálu MoldMAX® V je připraven pro samotný experiment a druhý pro zajištění opakovatelnosti experimentu.

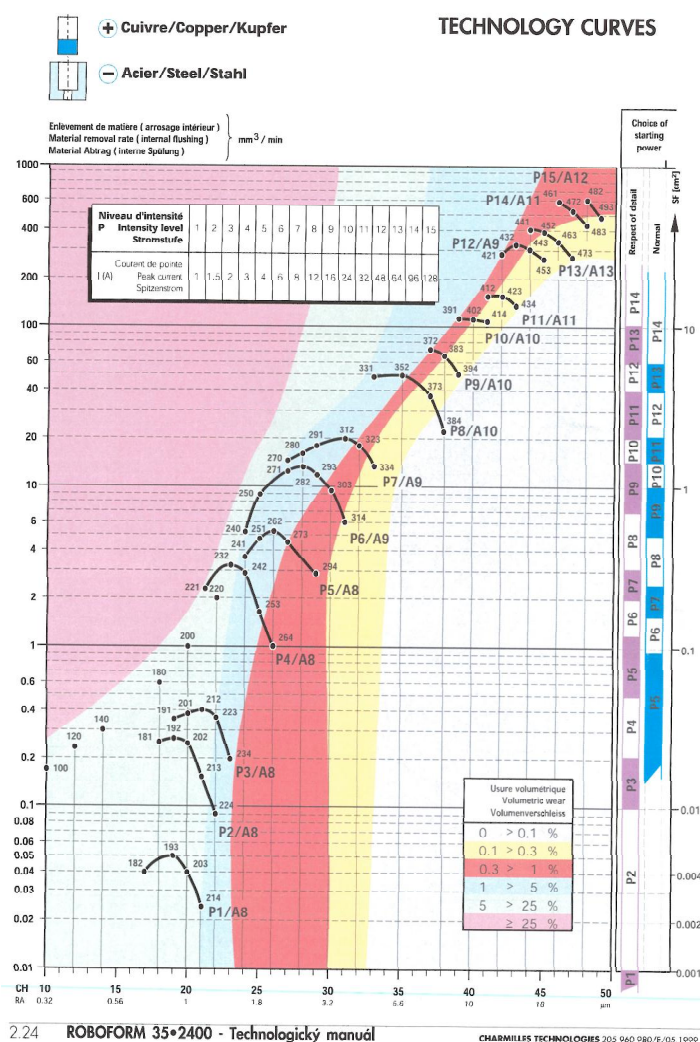
4.2 Experiment

Experiment je prováděn přímo ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. na oddělení Tool & Die pomocí hloubicí Roboform 23.

4.2.1 Nastavení obráběcích podmínek

Nastavení obráběcích podmínek se řídí technologickými křivkami a programy, které již byly ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. vytvořeny. Kombinace obrábění materiálu, které nejsou uvedeny v žádném technologickém nastavení, jako je obrábění materiálu MoldMAX®V m d nou elektrodou, jsou nastavovány ručně na základě konzultace se specialistou na elektroerozivní obrábění ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o..

Technologické tabulky jsou definovány typem použití aplikace a materiálovou dvojicí obrobek a nástrojovou elektrodou. Na obrázku 4.2 jsou znázorněny technologické křivky pro obrábění nástrojové oceli pomocí m d nou elektrody.

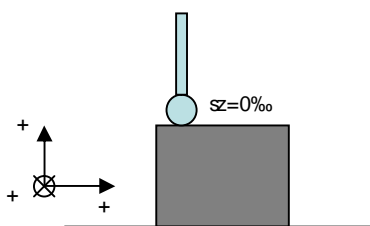


Obr.4.2 Technologické křivky m d nou nástrojová ocel [Technologický manuál EOBOFORM 35*2400 1999]

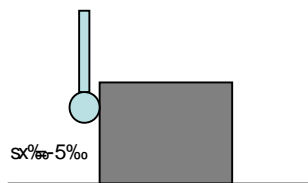
4.2.2 Ustavení obrobku a nástrojové elektrody

Obrobek z nástrojové oceli bude upnut pomocí magnetického stolu. Je vyrovnán za využití íselníkového úchylkom ru rovnob On s osou s_x . Obráb ný materiál MoldMAX[®]V je upevn n pomocí p esného sv ráku a následn vyrovnán v ose s_y . Jeliko0 je obrobek upnut do sv ráku, je nutné vyrovnat obrobek v ose s_z . Rovnob Onost osy s_y je zaru ena zúhlováním obou obrobk .

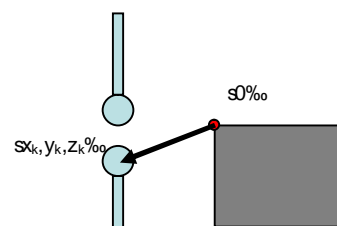
Po ustavení obrobku je místo nástrojové elektrody p ipevn na pomocná kuli ka, pomocí které se zjistí poloha obrobku, obr. 4.3, na kterém je znázorn no zadání sou adnice s_z . Obrázek 4.4 znázor uje zadání sou adnice s_x , která je zadána záporným polom rem kuli ky. Stejným zp sobem je zadána sou adnice s_y . Tím je vytvo en nulový bod obrobku. Dalzí kuli ka je umíst na na st l obrobku a jsou na ni p eneseny sou adnice s_{K,y_K,z_K} obr.4.5, které ozna ují polohu kuli ky v í nulovému bodu obrobku.



Obr.4.3 Zadání sou adnice s_z

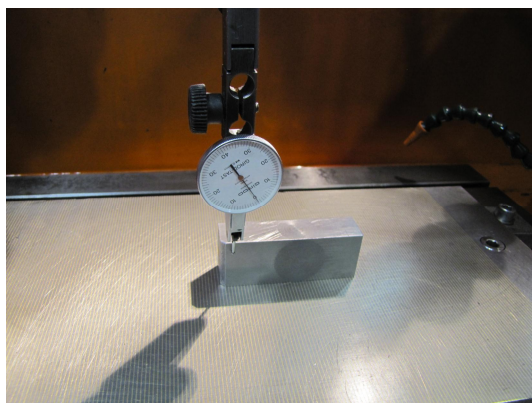


Obr. 4.4 Zadání sou adnice s_x

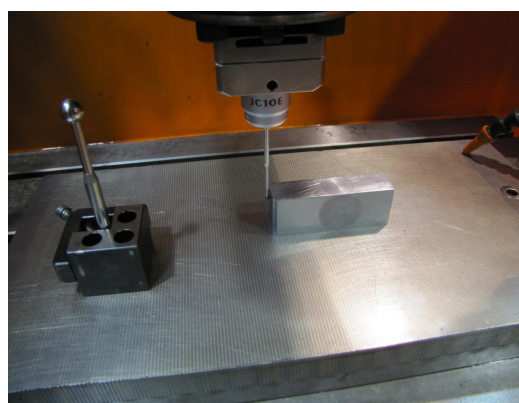


Obr. 4.5 P enesení sou adnic na pomocnou kuli ku

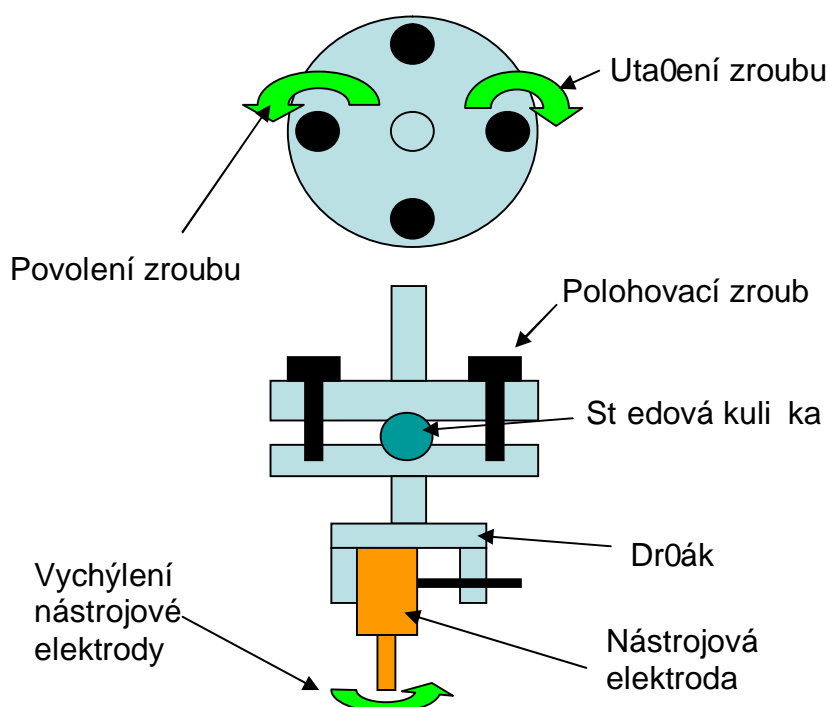
Nástrojové elektrody budou ustaveny do dr0áku. Dr0ák je pomocí p esné kleztiny upevn n do speciálního nástavce. Tento nástavec umoOní vyrovnat elektrodu tak, aby byla v í obrobku kolmá obrázek 4.8. Povolováním a utahováním zroub se nastavuje rovnob Onost nástrojové elektrody v í sou adnému systému



Obr.4.6 Ustavení obroku.

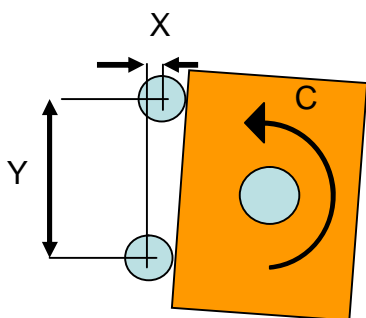


Obr. 4.7 P enesení sou adnic



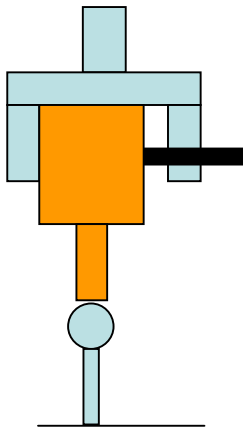
Obr.4.8 Speciální nástavec pro vyrovnání nástrojové elektrody.

Vyrovnání rotace osy ω nástrojové elektrody se provede ru n pomocí íselníkového úchylkom ru a nebo automaticky pomocí p íkazu ROTY12, na jeho0 základ si stroj so uká%nástrojovou elektrodu o ustavovací kuli ku ve vzdálenosti 12 mm a následn provede korekci rotace osy ω . Z dvodu úspory asu byla vybrána mo0nost automatického vyrovnání pomocí p íkazu.

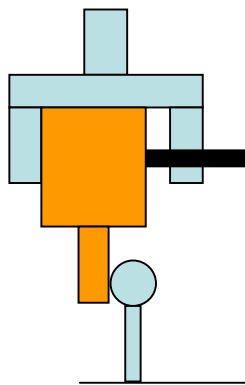


Obr.4.9 Schéma automatického vyrovnání nástrojové elektrody pomocí p íkazu, ROTY12

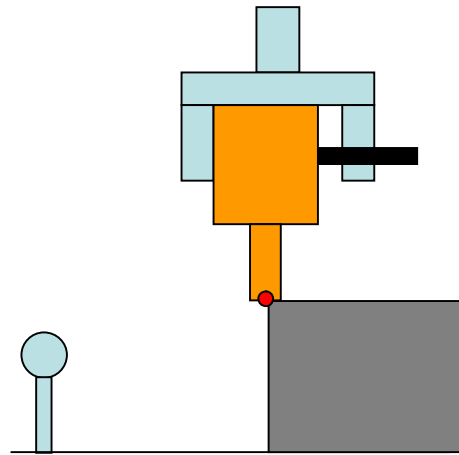
Po vyrovnání obrobku a nástrojové elektrody se p enesou sou adnice z pomocné kuli ky na nástrojovou elektrodu. P enesení sou adnice s_z je znázorn no na obrázku 4.10 a p enesení sou adnic s_x a s_y na obrázku. 4.11. Jakmile se sou adnice obrobku a nástrojové elektrody nachází ve stejném sou adném systému obr. 4.12 je mo0né zadávat sou adnice obráb ní.



Obr. 4.10 Najetí sou adnice s%na nástrojovou elektrodu%



Obr. 4.11 Najetí sou adnice s%a s%na nástrojovou elektrodu



Obr. 4.12 Sou adnicový systém obrobku je totoOný se sou adnicovým systémem nástrojové elektrody.

4.2.3 Pr b h experiment

Experimenty byly provád ěny v tomto po adí:

Jako první obráb ěný materiál byla zvolena nástrojová ocel a hloubení hrubovacími elektrodami v tomto po adí:

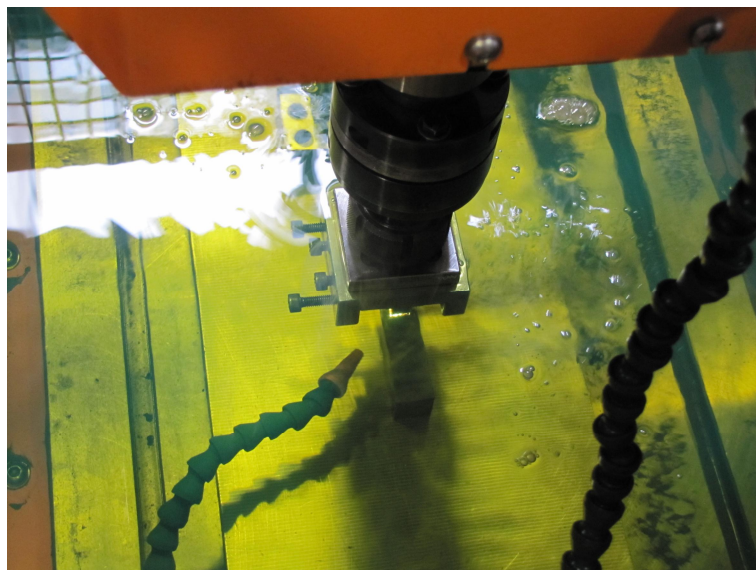
- 1) m d ná elektroda
- 2) grafit EDM-1
- 3) grafit EDM-200
- 4) grafit EDM-C200
- 5) grafit EDM-C3

as byl sledován na displeji stroje a ka0dou minutu byla ode ítána hloubka, ve které se nástrojová elektroda nachází. Jedná se o ode et hloubky, kterou ukazuje stroj. Reálnou hloubku není mo0né v pr b hu obráb ění zjistit, jeliko0 není v danou chvíli známé opot ebení nástrojové elektrody.

Po odhrubování vzech p ti vzork nástrojovými elektrodami byl obrobek vyndán z hloubi ky a stejným zp sobem byl odhrubován druhý obráb ěný materiál MoldMAX®V

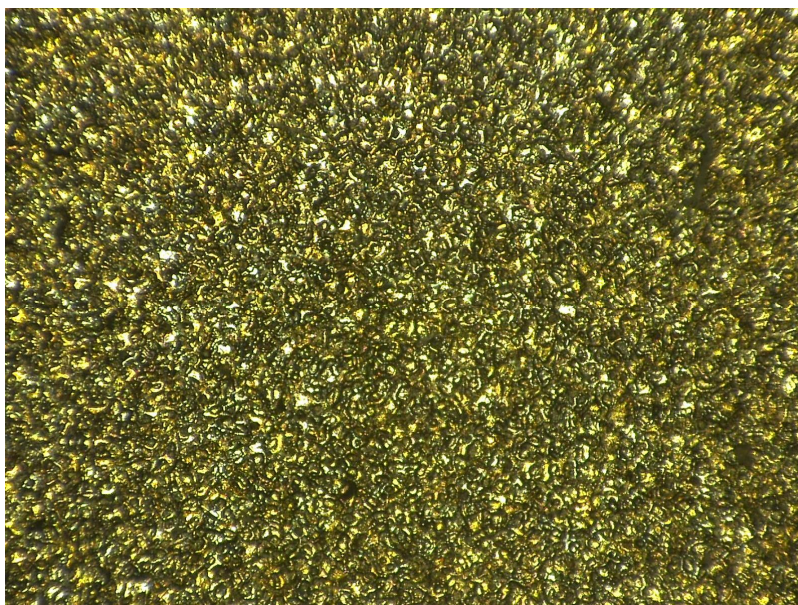
Po odhrubování obou materiál a následném vy izt ní od dielektrika byly zm ěny aktuální hloubky obráb ěných otvor .

Výsledky m ění byly zaznamenány a následn byla po ízena fotodokumentace obráb ěné plochy pomocí optického mikroskopu.



Obr. 4.13 Proces obrábění při experimentu.

Po zdokumentování obráběných ploch byly znovu obrobky ustaveny do hloubky a byl spuštěn dokončovací program. Po jeho dokončení byl opět vyčištěn povrch, změny hloubky otvorů po jednotlivých experimentech a pořízeny snímky mikroskopem, obrázek 4.14.



Obr. 4.14 50-tinásobně zvětšený detail hrubované plochy, nástrojová ocel obráběná grafitem EDM-1.

5. Výsledky

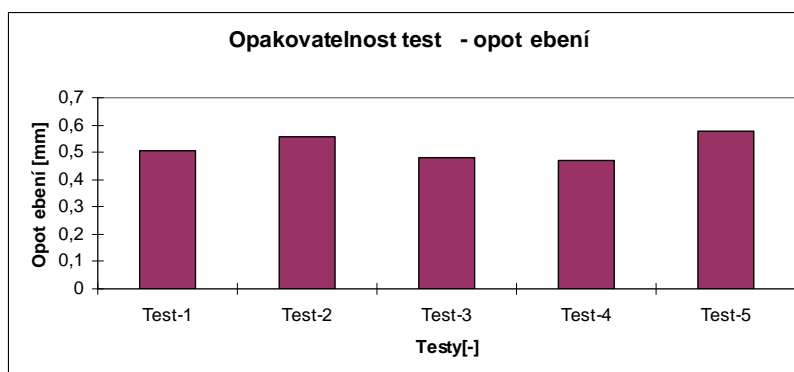
Výsledky experimentu jsou sledovány z hlediska ekonomického zhodnocení a dále podle času elektroerozivního obrábění, opotřebení nástrojové elektrody, rychlosti přípravky jednotlivých elektrod a kvality obrobeného povrchu.

5.1 Výsledky opakovatelnosti experiment

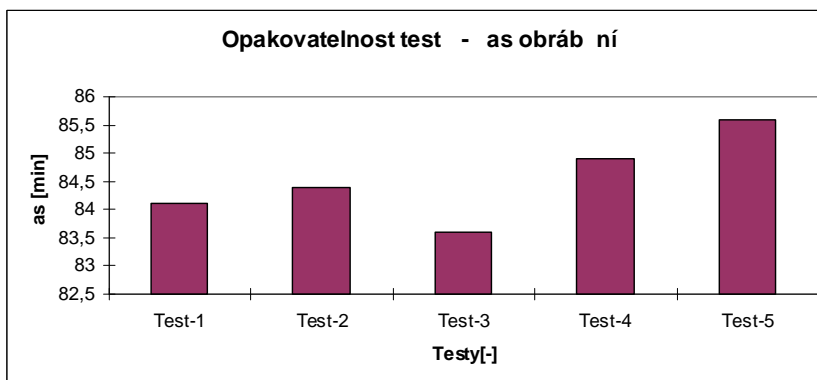
V tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledky test opakovatelnosti, které byly následně vyneseny do grafu 5.2, kde je vyneseno čas hloubení. V grafu 5.1 je vyneseno opotřebení nástrojové elektrody.

Test	as[min]	Opot. ební[mm]
Test-1	84,1	0,506
Test-2	84,4	0,559
Test-3	83,6	0,481
Test-4	84,9	0,468
Test-5	85,6	0,578

Tab.5.1 Tabulka výsledků opakovatelnosti měření



Graf.5.1 Graf výsledků opakovatelnosti měření - opot. ební



Graf.5.2 Graf výsledků opakovatelnosti měření - as obráb. ní

Statistické ukazatele, které se používají k výpočtu stability procesu jsou vyneseny v tabulce 5.2.

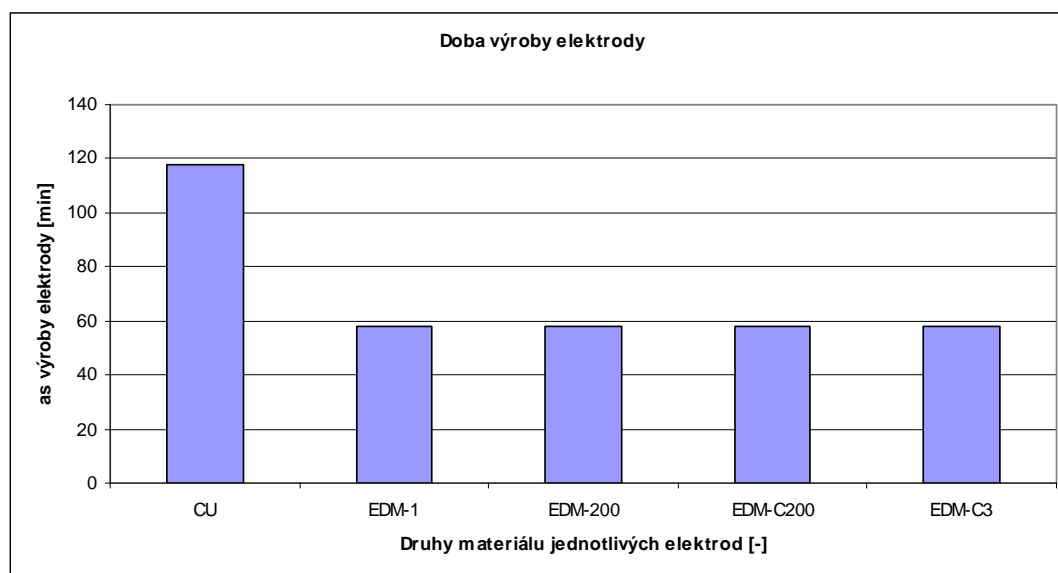
Veličina	Symbol	Opotřebení	Jednotky	as	Jednotky
Průměrná hodnota	\bar{x}	0,518	[mm]	84,52	[min]
Standardní odchylka	s	0,043	[-]	0,766	[-]
Statistický interval max	x_{\max}	0,623	[mm]	86,284	[min]
Statistický interval min	x_{\min}	0,410	[mm]	82,756	[min]
Skutečný interval spolehlivosti	t_{skut}	4,783	[-]	5,222	[-]

Tab. 5.2 Statistické ukazatele pro výpočet stability měření

Hodnota $t_{\text{skut_op}}=4.783$ pro opotřebení i hodnota $t_{\text{skut_cas}}=5.222$ pro dobu obrábění je v této hodnota v tabulce 3.4 $t_{99}=4.604$ z čehož vyplývá, že opakovatelnost experimentu v úrovni spolehlivosti je v této 99%.

5.2 Doba p řpravy elektrod

Graf 5.3 umožňuje porovnat dobu p řpravy jednotlivých elektrod. Z grafu je patrné, že doba p řpravy měděné elektrody je dvojnásobná oproti času výroby grafitové elektrody.



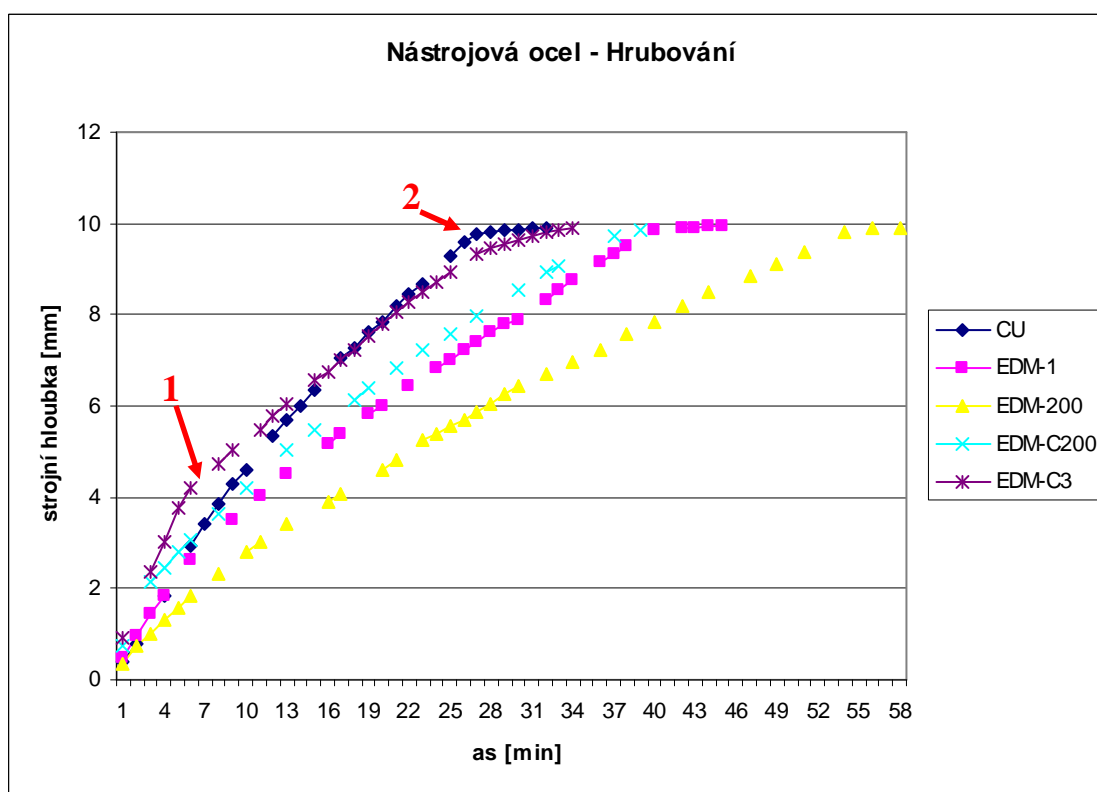
Graf.5.3 Doba výroby elektrod z různých materiálů

5.3 Porovnání obrábění s

Při sledování průběhu času byla zvolena jako nezávislá hodnota čas, jelikož ji lze snadno kontrolovat a k ní byla zapisována závislá hodnota hloubka elektrody.

5.3.1 Porovnání obrábění s hrubovací elektrodou

Jako první probíhal test obrábění nástrojové oceli hrubovací elektrodou. Výsledky testu jsou zobrazeny grafu 5.4, kompletní tabulka hodnot je v příloze 2. Hrubování bylo naprogramováno od nulové hloubky do hloubky 10 mm. Ve skutečnosti hloubení probíhalo do nižší hloubky. Od naprogramované hloubky bylo odečteno projisknutí elektrody. Výsledná hloubka hrubovací elektrody byla dále menší o hodnotu opotřebení nástrojové elektrody.



Graf. 5.4 Hrubování do nástrojové oceli různými druhy elektrod

Na procesu hrubování je vidět, že z pohledu rychlosti obrábění je velmi rychlé. Nejvíce patrné je to na elektrodě vyrobené z Grafitu EDM-C3, (v grafu 5.4 označená s1%). Úběr v hloubce kolem 2 mm je 0,8 mm/min. V hloubce 8 mm je úběr 0,21 mm/min. Na ostatních materiálech není tento zlom tak skokový a dochází také ke zpomalení obrábění. Příčinou je horší odvod teploty z místa obrábění, který způsobuje výskyt

chybných pulz obrábění, čímž je stroj nucen obrábění zpomalit. Pokud by došlo ke zpomalení obrábění, proces by se stabilizoval. V případě, kdy by stroj automatickou korekci neprovedl, mohlo by dojít k následujícím problémům:

- výrazné zpomalení obrábění, v krajním případě až zastavení obrábění,
- natečení zbytek obráběného materiálu na elektrodu, čímž dojde ke zvětšení nástrojové elektrody (pohloubení tvaru).

V našem případě stroj provádí tyto korekce plně automaticky.

Do oblasti (2) v grafu 5.4 se pohybuje elektroda pouze v jedné ose a to v ose s_z . Když elektroda dosáhne určité hloubky, v našem případě to je přibližně 9,6 mm, začne se snižovat tzv. generátorové číslo (zmenšení elektrického proudu), začínají se zmenšovat výboje. Tím dochází ke zpomalení obrábění a zároveň k menším kráterům na povrchu obrobku.

```

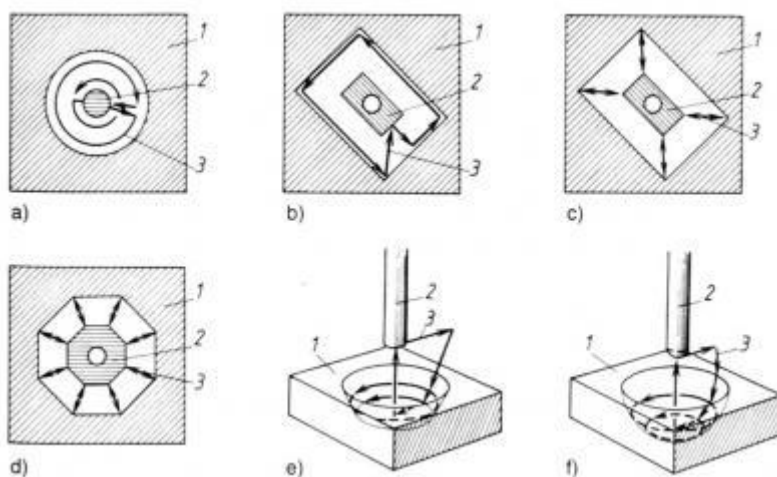
1:PN/CUST025
2:COORD/METR
3:AUXF/26
4AUXF/60
5:TECHNO/F,UCUAC
6:FLUSH/LL,1,LR,1
7:L1=$1
8:AXE/Z
9:FROM/X,0,Y,0,Z,10
10:DOWN/L,L1,H,-0.25,E,391
11:ORB/L,L1,H,-0.22,E,352
12:ORB/L,L1,H,-0.18,E,331
13:ORB/L,L1,H,-0.12,E,291
14:ORB/L,L1,H,-0.10,E,282,RET
15:FLUSH/LL,0,LR,0
16:AUXF/23
17:END

```

*v červeném poli jsou jednotlivé
jiskrové mezery a v modrém poli
jsou znázorněna čísla
generátor*

*Obr. 5.1 Program pro
elektroerozivní obrábění*

Aby bylo možné obrábět i pomocí menších výbojů, musí stroj vykonat pohyb v ose s_x a v ose s_y a samozřejmě je vykonán i pohyb v ose s_z . Tento pracovní pohyb nástrojové elektrody se nazývá orbování.



1) obrobek, 2) nástrojová elektroda, 3) pracovní pohyb nástrojové elektrody.
a) kruhové, b) obdelníkové po obvodu, c) obdelníkové do roh , d) osmihrané, e) kuželové, f) kulové

Obr. 5.2 Orbování nástrojové elektrody.

Po adí rychlosti hrubování je znázorněno v následující tabulce tab. 5.3, kde jsou zaznamenány výsledné doby hrubování do nástrojové oceli.

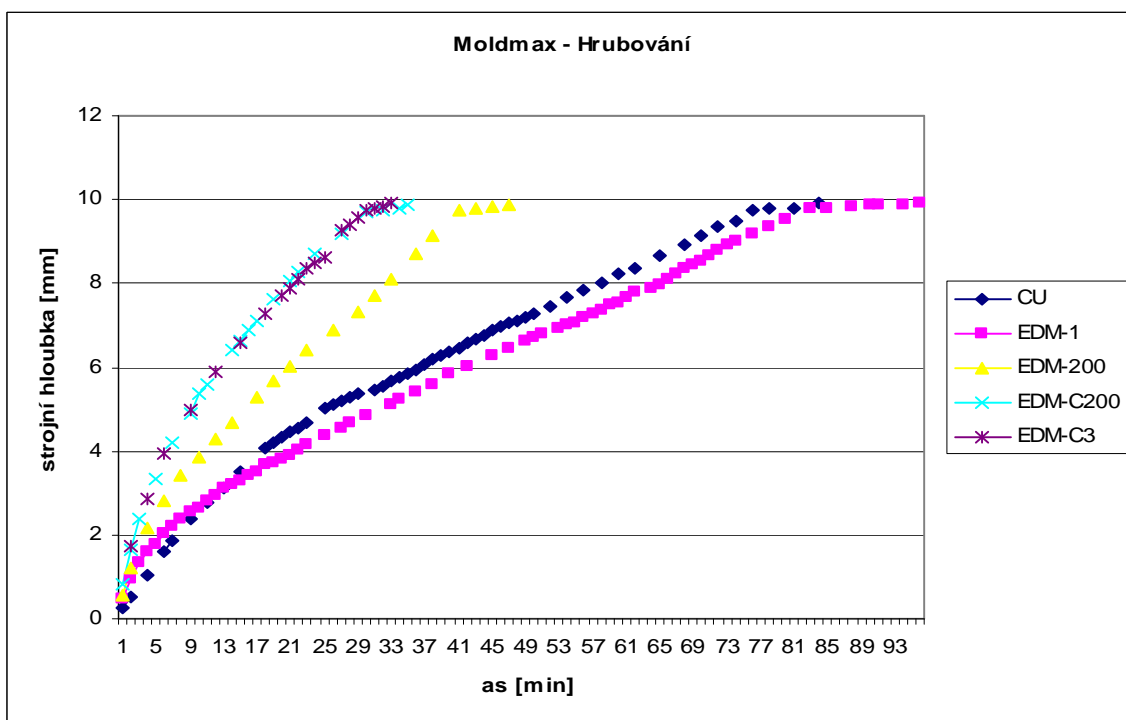
Hrubování - nástrojová ocel		
Po adí	čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	33:16	CU
2	34:45	EDM-C3
3	42:20	EDM-C200
4	45:27	EDM-1
5	59:40	EDM-200

Tab. 5.3 Po adí rychlosti obrábění a doby obrábění hrubovacích elektrod při hloubení do nástrojové oceli

Stejný princip byl použit i při hrubování materiálu MoldMAX® V. Výsledky jsou zobrazeny v příloze 2 hodnoty vyneseny do grafu 5.5.

Hrubování - MoldMAX® V		
Po adí	čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	33:12	EDM-C3
2	35:34	EDM-C200
3	47:52	EDM-200
4	84:35	CU
5	96:18	EDM-1

Tab. 5.4 Po adí rychlosti obrábění a doby obrábění hrubovacích elektrod při hloubení do materiálu MoldMAX® V



Graf. 5.5 Hrubování do materiálu MoldMAX[®]V r znými druhy materiálu

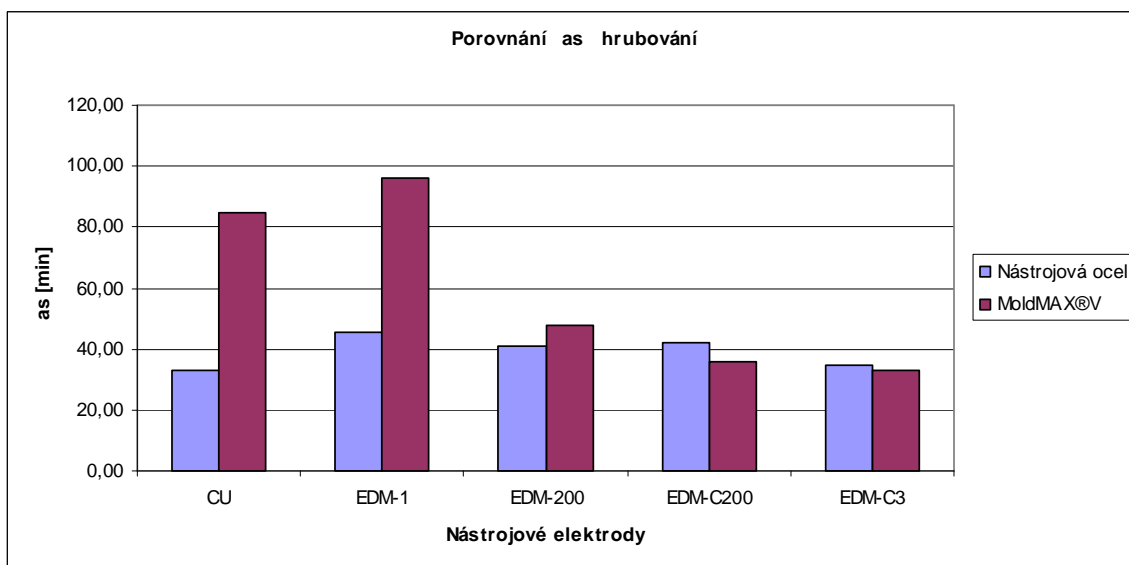
I zde je pozorováno postupné zpomalování obrábění, jako tomu bylo p i obrábění nástrojové oceli. Po adí rychlosti hrubování je v tabulce 5.4, kde jsou uvedeny výsledné asy hrububování do materiálu MoldMAX[®]V.

Následující graf 5.6 a tabulka 5.5 porovnává rozdíly v rychlosti obrábění nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX[®]V.

Materiál elektrody	Nástrojová ocel [min]	Moldmax [min]
CU	33,27	84,58
EDM-1	45,45	96,30
EDM-200	40,67	47,87
EDM-C200	42,33	35,57
EDM-C3	34,75	33,20

Tab. 5.5 Porovnání as hrubování do nástrojové oceli a do MoldMAX[®]V

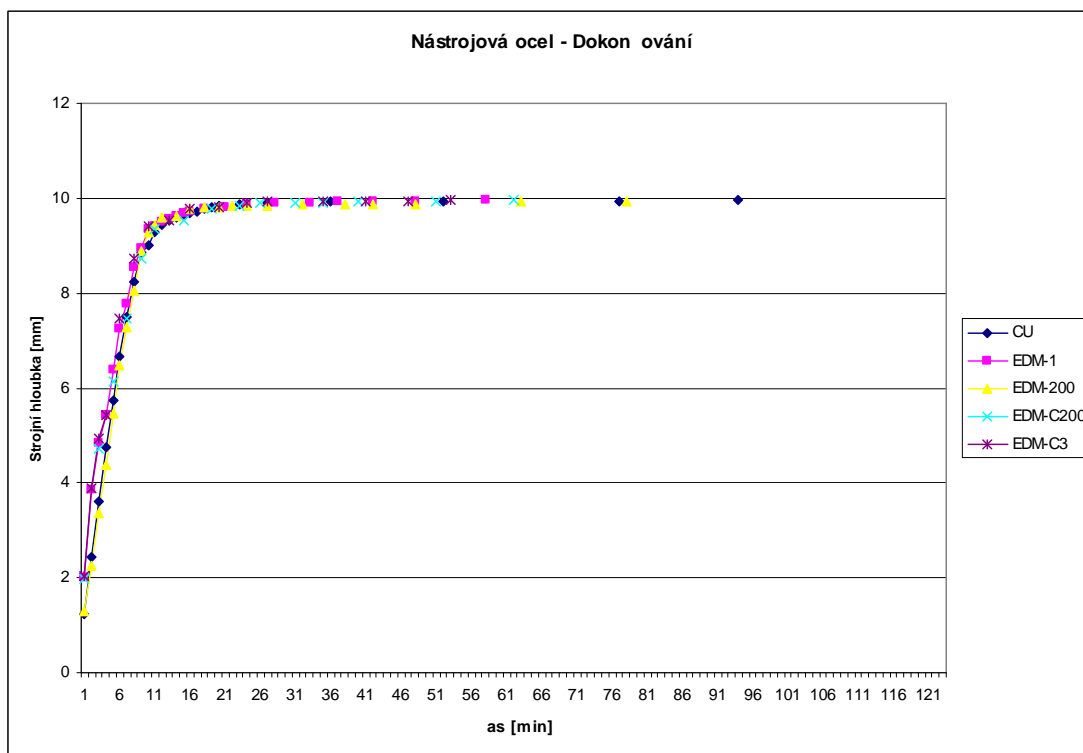
Modrý sloupec ukazuje dobu obrábění nástrojové oceli, červený sloupec ukazuje dobu obrábění materiálu MoldMAX® V. Z výsledků je vidět, že největší rozdíl je u elektrod z mědi a EDM-1.



Graf. 5.6 Porovnání časů hrubování do nástrojové oceli a do materiálu MoldMAX® V

5.3.2 Porovnání obráběcích a dokončovací elektrodou.

Obrábění dokončovací elektrodou pokračuje po hrubování. Následující graf 5.7 popisuje průběh obrábění nástrojové oceli.



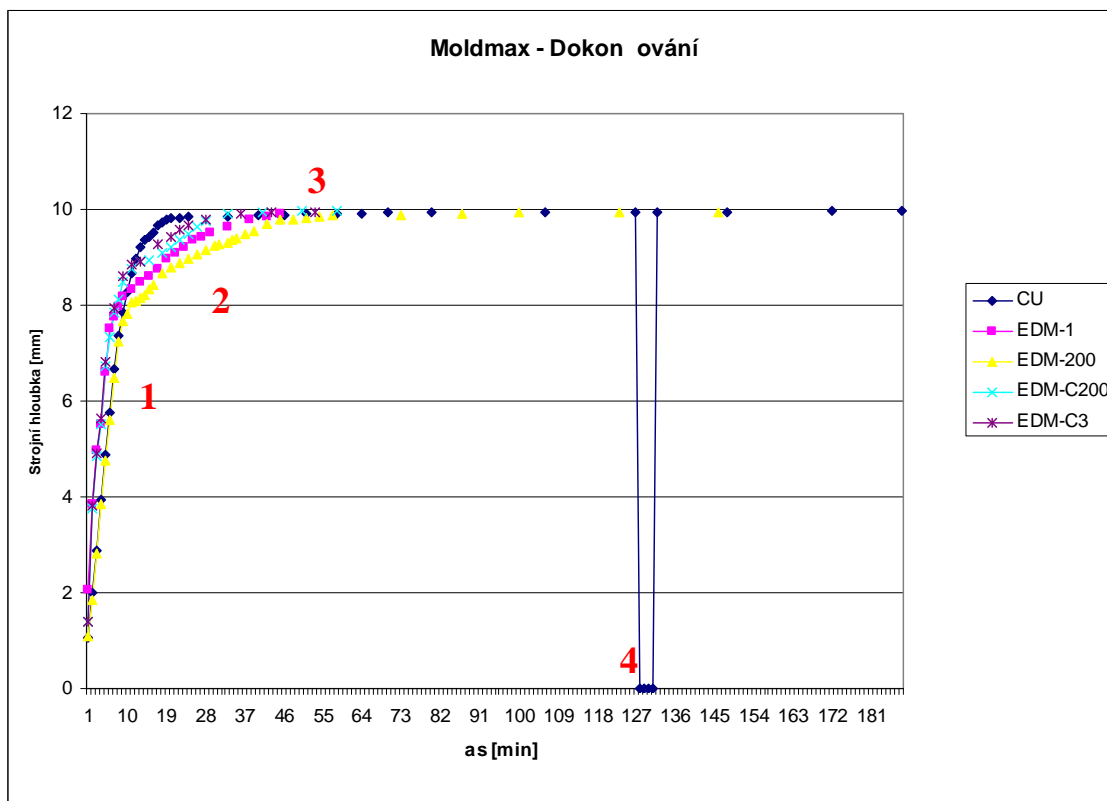
Graf. 5.7 časový průběh dokončovacího hloubení do nástrojové oceli

Stejná metoda je použita u dokončovacích elektrod pro materiál MoldMAX® V. Průběh obrábění je znázorněn v grafu 5.8 a kompletní hodnoty se nacházejí v příloze 2.

Zpočátku hloubení dokončovací elektrody je rychlost obrábění vysoká cca 1 mm až 2 mm za minutu (1) v grafu 5.8. Tato rychlost je způsobena úběrem malé elné plochy, protože se obrábí pouze malou plochou. Velikost elné plochy je rozdíl předhrubované plochy a elné plochy elektrody. Obrábění se zpomalí (zhruba na 0,1mm až 0,2 mm za minutu), jelikož dojde ke zvětšení elné obráběcí plochy (2) v grafu 5.8. Náznak to zobrazuje graf obrábění materiálu MoldMAX®V pomocí elektrody EDM-200. K dalšímu zpomalení dochází v bodu (3) grafu 5.8, když finalizování elektroda začne orbovat, dojde k postupnému snižování generátorového ísla (snížení elektrického proudu). Tento proces je detailně popsán u hrubování.

Dokončování - Moldmax		
Pořadí	čas hrubování [min:sec]	Materiál elektrody
1	53:49	EDM-C3
2	58:49	EDM-C200
3	65:38	EDM-1
4	146:47	EDM-200
5	188:26	CU

Tab..5.6 Pořadí hrubování materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.8 asový pr b h dokon ovacího hloubení do materiálu MoldMAXu V

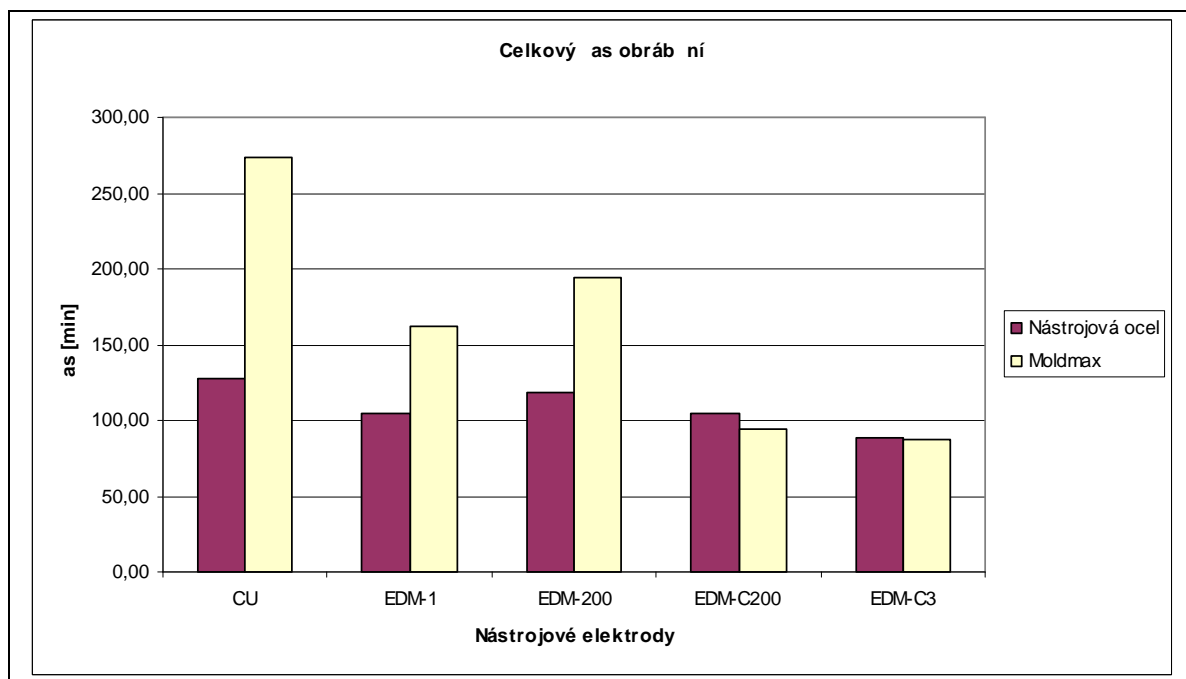
V oblasti grafu 5.8 (4) dozlo k zastavení úb ru materiálu (100% chybných pulsu), proto se muselo p eruzit obráb ní a místo se muselo vy istit od ne istot. Po tomto zásahu se obráb ní vrátilo do normálu.

5.3.3 Celkové asy obráb ní

V tabulce 5.7 a grafu 5.9 jsou vyneseny celkové asy obráb ní jak pro materiál MoldMAX[®] V, tak pro nástrojovou ocel.

Materiál elektrody	Nástrojová ocel [min]	Moldmax [min]
CU	127,70	273,01
EDM-1	104,38	161,93
EDM-200	118,89	194,65
EDM-C200	104,55	94,39
EDM-C3	88,05	87,02

Tab 5.7 Rychlost obráb ní nástrojové elektrody a materiál MoldMAX[®] V pro dokon ování



Graf. 5.9 Celkový čas obrábění

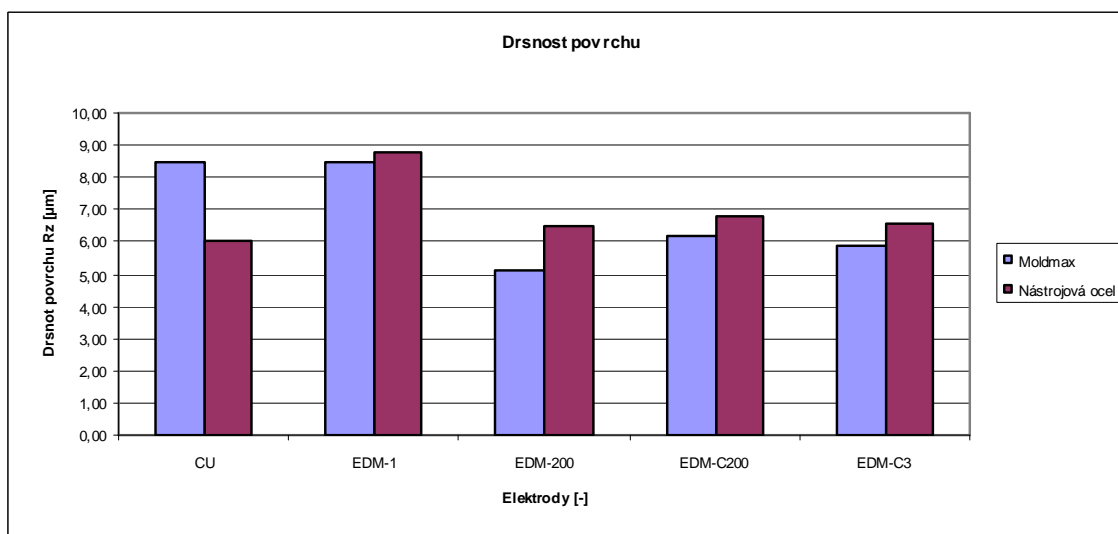
Nejkratší čas pro obrábění jak nástrojové oceli, tak materiál MoldMAX® V má grafitová elektroda sycená m dří EDM-C3, kde čas obrábění je 87 min a 88 min.

5.4. Naměřené drsnosti povrchu

Měření VDI je velice subjektivní, a proto byla změřena drsnost Rz na 5 mm délky obráběné plochy a tato drsnost byla porovnávána mezi jednotlivými výsledky testů. Výsledky jsou porovnány v příložené tabulce 5.8 a v grafu 5.10, kde je znázorněn jak obráběný materiál, tak nástrojová elektroda.

Obráběný materiál	Materiál elektrody	Rz [μm]
Moldmax	CU	8,50
	EDM-1	8,50
	EDM-200	5,10
	EDM-C200	6,20
	EDM-C3	5,90
Nástrojová ocel	CU	6
	EDM-1	8,8
	EDM-200	6,5
	EDM-C200	6,8
	EDM-C3	6,6

Tab. 5.8 Drsnost povrchu



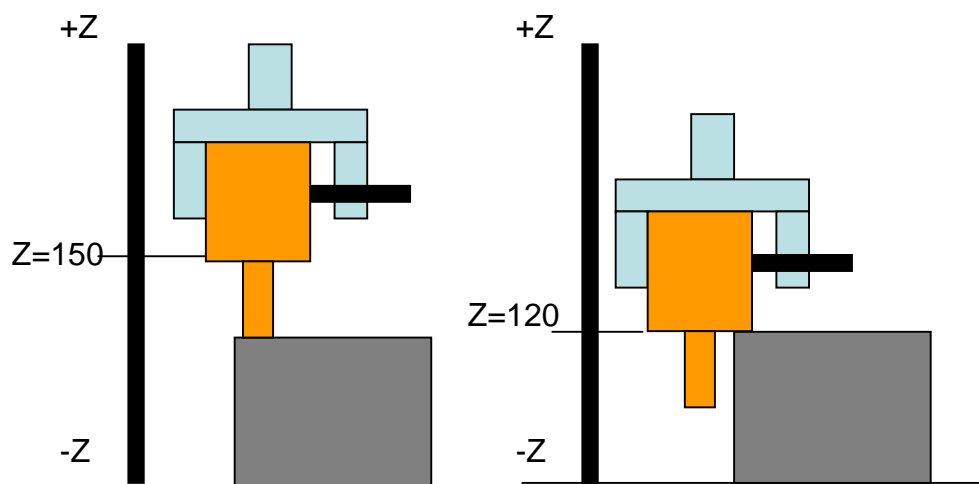
Graf: 5.10 Drsnost povrchu

Z výsledků měření drsnosti povrchu je patrné, že rozdíl mezi nejhrubším $R_z = 8,8 \mu\text{m}$ a nejjemnějším povrchem $R_z = 6 \mu\text{m}$ je velmi malý. Nejlepší povrch při obrábění nástrojové oceli i materiálu MoldMAX® V je EDM-200. Protokoly z jednotlivých měření jsou v příloze 3

5.5 Opotěbení nástrojových elektrod

Opotěbení je jednou z hlavních hodnot, kterou je zapotřebí sledovat při elektroerozivním obrábění. Vysoké opotěbení nástrojové elektrody má za následek výzvěsnost výroby něho dílu. Případně je nutno použít více elektrod a tím pádem prodloužení celého procesu obrábění.

Měření opotěbení se provádělo přímo na obráběcím stroji před obráběním a tím samým způsobem po obrábění. Způsob měření je znázorněn na obr. 5.3. Nejprve byla zjištěna souadnice SZ_{150} mm ely nástroje a následně souadnice SZ_{120} mm plochy pro ustavování elektrody. Rozdílem těchto dvou souadnic (30mm) byla zjištěna délka elektrody.



Obr. 5.3 Způsob měření délky elektrody pro výpočet opotřebení

5.5.1 Opotřebení hrubovací elektrody

Opotřebení hrubovací elektrody sice nemá přímý vliv na kvalitu rozměru, ale nechává v tvářenosti obráběného materiálu na dokončovací elektrodě. Jelikož dokončovací elektroda má menší rychlost úběru oproti hrubovací, výrazně se s tím prodlouží doba obrábění a má nepřímý vliv i na opotřebení nástrojové elektrody.

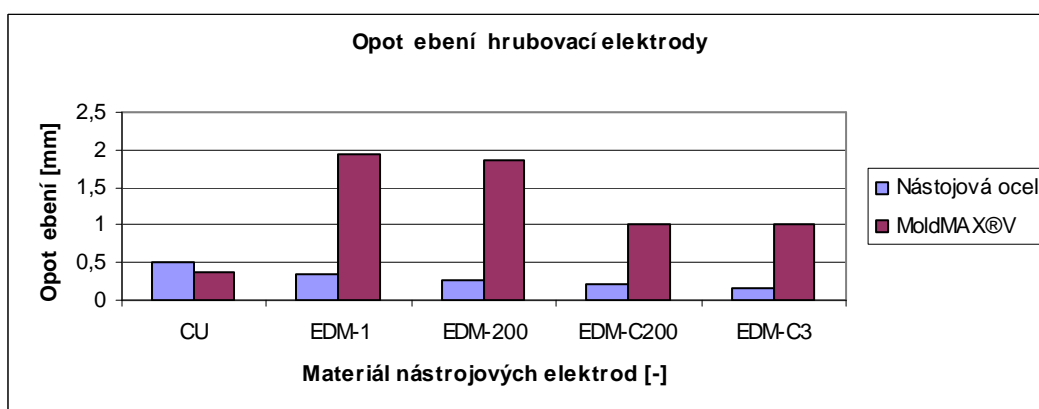
V následujících tabulkách 5.9 a 5.10 jsou vyneseny hodnoty rozměrů nástrojových elektrod před a po obrábění. Také je zde vypočteno opotřebení hrubovací elektrody. Rozdíl délky elektrody před obráběním a po obrábění je brán jako opotřebení elektrody. Hodnoty pro nástrojovou ocel jsou v tab. 5.9 a pro materiál MoldMAX®V tab. 5.10. Oba materiály jsou pro porovnání vyneseny do grafu graf 5.11.

	Opotřebení hrubovací elektrody - nástrojová ocel				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	24,933	25,066	25,224	24,94	25,066
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,427	24,733	24,966	24,73	24,915
Opotřebení elektrody [mm]	0,506	0,333	0,258	0,21	0,151

Tab. 5.9 Opotřebení hrubovací elektrody nástrojová ocel

	Opot ebení hrubovací elektrody - MoldMAX® V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	24,998	25,023	25,03	24,976	25,079
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,617	23,073	23,171	23,97	24,08
Opot ebení elektrody [mm]	0,381	1,95	1,859	1,006	0,999

Tab. 5.10 Opot ebení hrubovací elektrody materiálu MoldMAX® V



Graf. 5.11 Opot ebení hrubovací elektrody

Z naměřených hodnot je patrné, že při obrábění měrnou elektrodou dochází k podobnému opotřebení jak u nástrojové oceli, tak u materiálu MoldMAX® V. Grafit má nižší opotřebení u nástrojové oceli než u materiálu MoldMAX® V. Grafitové elektrody s přísadkou manganu dosahují polovičního opotřebení vůči grafitu bez manganu.

5.5.2 Opot ebení dokončovací elektrody

Měření opotřebení se provádělo přímo na obráběcím stroji před obráběním a tím samym způsobem po obrábění. Způsob měření je znázorněn na obr. 5.3. Opotřebení dokončovací elektrody bylo měřeno stejným způsobem jako opotřebení hrubovací elektrody.

	Opot ebení dokon ovací elektrody - nástrojová ocel				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	25,014	25,005	25,024	25,001	24,995
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,975	24,960	25,005	24,990	24,985
Opot ebení elektrody [mm]	0,039	0,045	0,019	0,012	0,010
Hloubka otvoru po hrubování [mm]	9,14	9,372	9,447	9,495	9,554

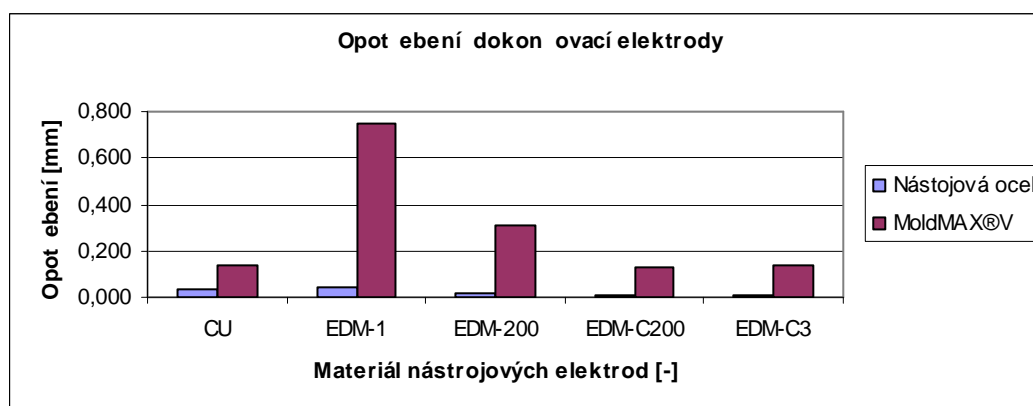
Tab. 5.11 Opot ebení dokon ovací elektrody pro nástrojovou ocel

V tabulce 5.11 jsou uvedeny hodnoty naměřených délek elektrod a opot ebení pro nástrojovou ocel a v tab. 5.12 pro MoldMAX® V.

	Opot ebení dokon ovací elektrody - MoldMAX® V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Délka elektrody před obráběním [mm]	25,014	25,012	25,007	25,02	25,018
Délka elektrody po obrábění [mm]	24,875	24,264	24,695	24,888	24,884
Opot ebení elektrody [mm]	0,139	0,748	0,312	0,132	0,134
Hloubka otvoru po hrubování [mm]	9,277	7,765	7,856	8,709	8,716

Tab. 5.12 Opot ebení dokon ovací elektrody pro materiál MoldMAX® V

Hodnoty opot ebení pro dokon ovací elektrody jsou vyneseny v grafu 5.11.



Graf. 5.12 Opot ebení dokon ovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX® V

Z naměřených hodnot je zřejmé mnohem nižší opotřebení elektrod, které obráběly nástrojovou ocel, než které obráběly materiál MoldMAX®V.

Protože opotřebení hrubovací elektrody je poněkud jiné, má tím dokonovací elektroda rozdílnou hloubku úbřívku, proto se počítá s procentuálním opotřebením dokonovací elektrody podle vzorce:

$$OP_{\text{proc}} = \frac{hl_{\text{vykres}} - hl_{\text{skut}}}{OP_{\text{fin_el}}} \quad (16)$$

kde: OP_{proc} – procentuální opotřebení nástrojové elektrody [%]

hl_{vykres} – výkresová hloubka otvoru [mm]

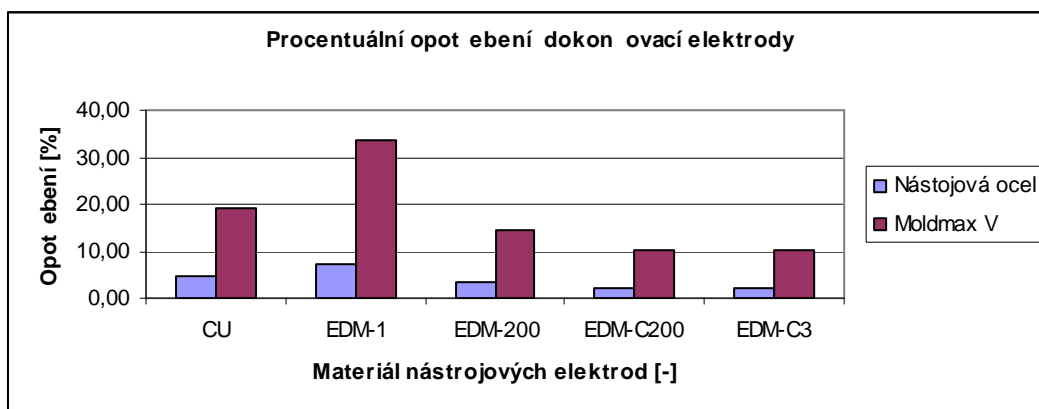
hl_{skut} – skutečná hloubka otvoru po hrubování [mm]

$OP_{\text{fin_el}}$ – opotřebení dokonovací elektrody [mm]

Hodnoty pro výpočet jsou vyneseny v tabulce 5.13 a výsledné procentuální opotřebení je vyneseno do grafu 5.13

	Procentuální opotřebení dokonovací elektrody [%]				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
MoldMAX® V	4,50	7,24	3,49	2,28	2,16
Nástrojová ocel	19,21	33,47	14,56	10,22	10,41

Tab. 5.13 Opotřebení dokonovací elektrody pro MoldMAX®V



Graf. 5.13 Opotřebení dokonovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX®V

U obrábění dokonovací elektrodou je menší opotřebení elektrody při obrábění nástrojové oceli než při obrábění materiálu MoldMAX®V. Nejnižšího procentuálního opotřebení u dokonování dosahují grafitové elektrody s přísádkou molybdenem.

5.6 Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení je prováděno pro tyto konkrétní podmínky. Pro jiný případ se může lišit, jelikož poměr ceny práce na výrobu elektrody a ceny polotovaru může být jiný.

5.6.1 Náklady na výrobu jednotlivých elektrod

Náklady na výrobu elektrod jsou považovány stejné jako pro hrubovací, tak dokončovací elektrodu, protože se vyrábí ze stejného materiálu a jsou upravovány stejným programem.

Cena elektrody se skládá ze dvou složek: z ceny vstupního materiálu pro elektrodu a z ceny výroby elektrody.

$$C_{el} = C_{mat} + N_{vy_el} \quad (16)$$

kde: C_{el} .. cena elektrody [K],
 C_{mat} .. cena polotovaru [K],
 N_{vy_el} .. náklady na výrobu elektrody [K].

Výpočet ceny materiálu nástrojové elektrody:

$$C_{mat} = \frac{V_{pol} \cdot JC_{pol}}{10^6} \quad (17)$$

kde: V_{pol} .. objem polotovaru elektrody [mm³],
 JC_{pol} .. jednotková cena polotovaru elektrody [K /dm³].

Výpočet objemu polotovaru:

$$JC_{polo} = a \cdot b \cdot c \quad (18)$$

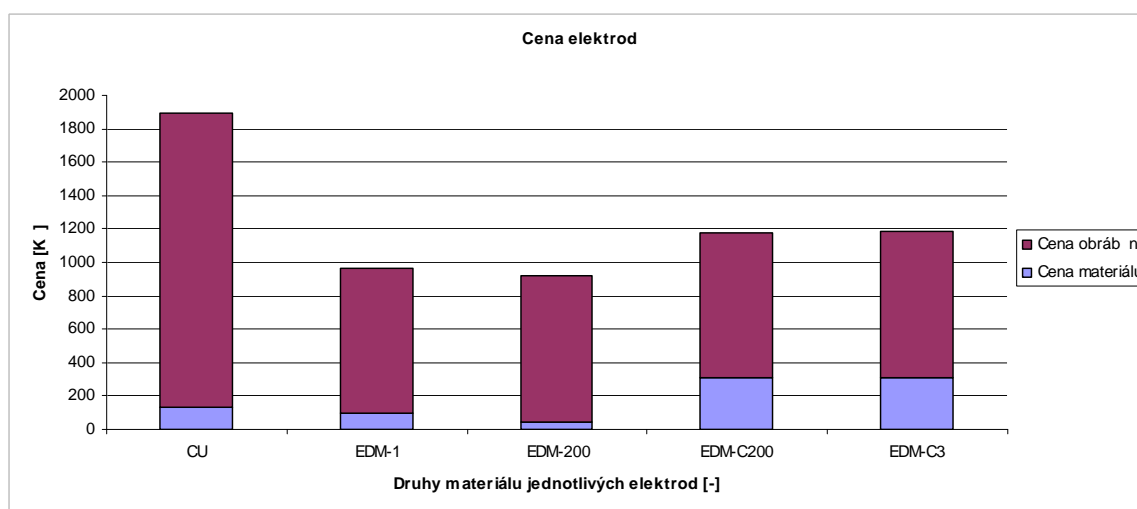
kde: a, b, c .. rozměry polotovaru [mm].

V tabulce 5.14 je zobrazen kompletní přehled údajů o cenách, rozměrech elektrod z jednotlivých materiálů a hodinových sazbách CNC

Popis	Jednotka	Materiál elektrody				
		CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Objem polotovaru pro elektrodu	[dm ³]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Rozměr a	[mm]	25	25	25	25	25
Rozměr b	[mm]	25	25	25	25	25
Rozměr c	[mm]	40	40	40	40	40
Jednotková cena polotovaru	[K /dm ³]	5200	3900	1840	12250	12500
Cena polotovaru	[K]	130	97,5	46	306,25	312,5
Cena hodinové sazby na CNC	[K /hod]	900	900	900	900	900
Doba výroby elektrody	[min]	117,8	58,1	58,1	58,1	58,1
Cena Výroby elektrod	[K]	1767	871,5	871,5	871,5	871,5
Cena elektrody	[K]	1897	969	917,5	1177,75	1184

Tab. 5.14 Oproti ebení dokončovací elektrody pro nástrojovou ocel a MoldMAX[®]V

Graf 5.14 zobrazuje poměr nákladů na výrobu elektrod a cenu polotovaru materiálu. Z grafu je patrné, že náklady na výrobu elektrody jsou řádově vyšší, než je cena materiálu pro elektrody. Cena materiálu elektrody je nejvyšší z důvodu delšího obrábění času oproti elektrodám grafitovým.



Graf. 5.14 Cena elektrod pro jednotlivé materiály

5.6.2 Náklady na hrubování

Náklady pro elektrozivní obrábění se počítají z násobku hodinové sazby EDM stroje a doby obrábění:

$$N_{\text{hrub}} = t_{\text{hrub}} \cdot JCS_{\text{EDM}} \quad (19)$$

kde: N_{hrub} – Náklady na hrubování [K],

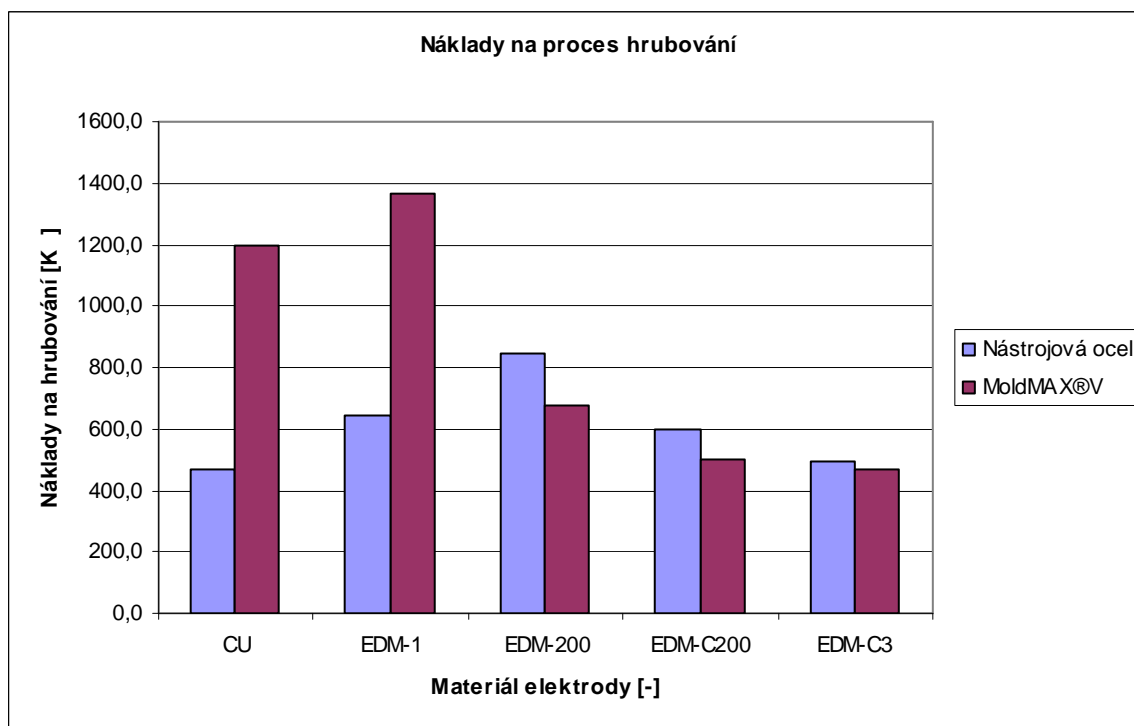
t_{hrub} – čas hrubování [hod],

JCS_{EDM} – jednotková cena stroje EDM [K /hod].

Náklady na hrubování pro nástrojovou ocel a materiál MoldMAX[®]V jsou zobrazeny v grafu 5.15. Z grafu je patrné, že náklady na proces hrubování materiálu nástrojové elektrody a elektrody z grafitu EDM-1 jsou velice rozdílné pokud jde o obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX[®]V. Nejmenší zřejmý rozdíl mezi obráběním se jeví u grafitové elektrody s přísádkou materiálu EDM-C3 a EDM-C200.

Náklady na hrubování	Nástrojová ocel	Moldmax
CU	471,3	1198,2
EDM-1	643,9	1364,3
EDM-200	845,3	678,2
EDM-C200	599,7	503,9
EDM-C3	492,3	470,3

Tab. 5.15 Náklady na proces hrubování nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX[®]V



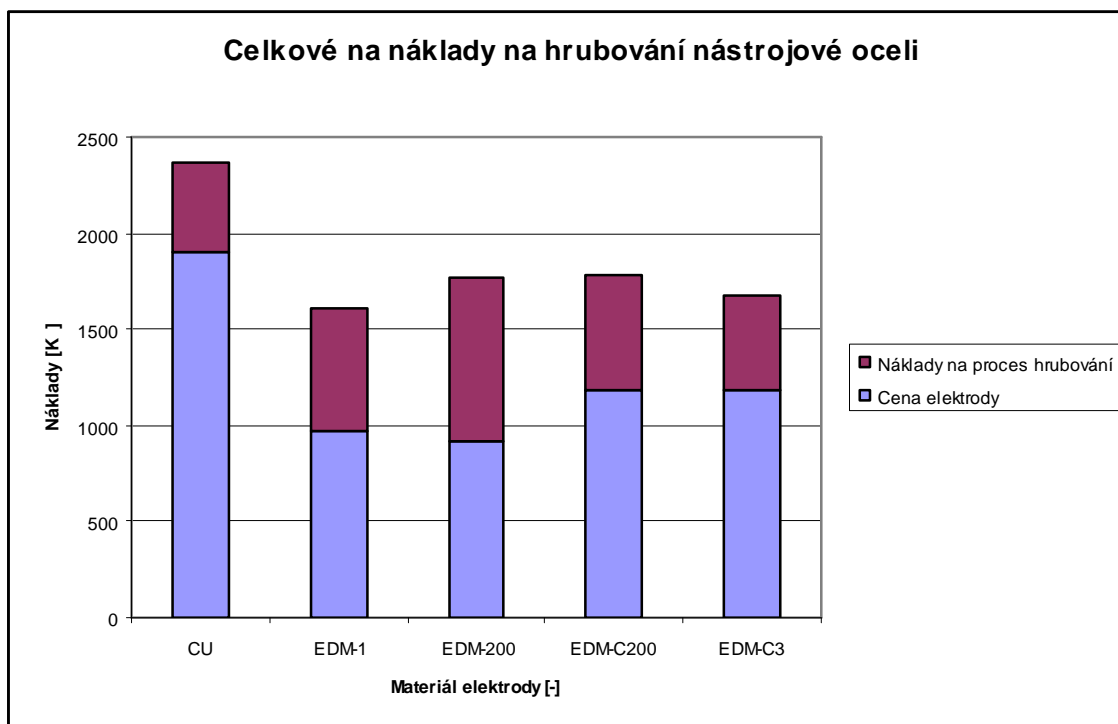
Graf. 5.15 Náklady na proces hrubování nástrojové elektrody a materiálu MoldMAX[®]V

Celkové náklady na hrubování vypočítáme podle vzorce:

$$CN_{\text{hrub}} = C_{\text{el}} + N_{\text{hrub}} \quad (20)$$

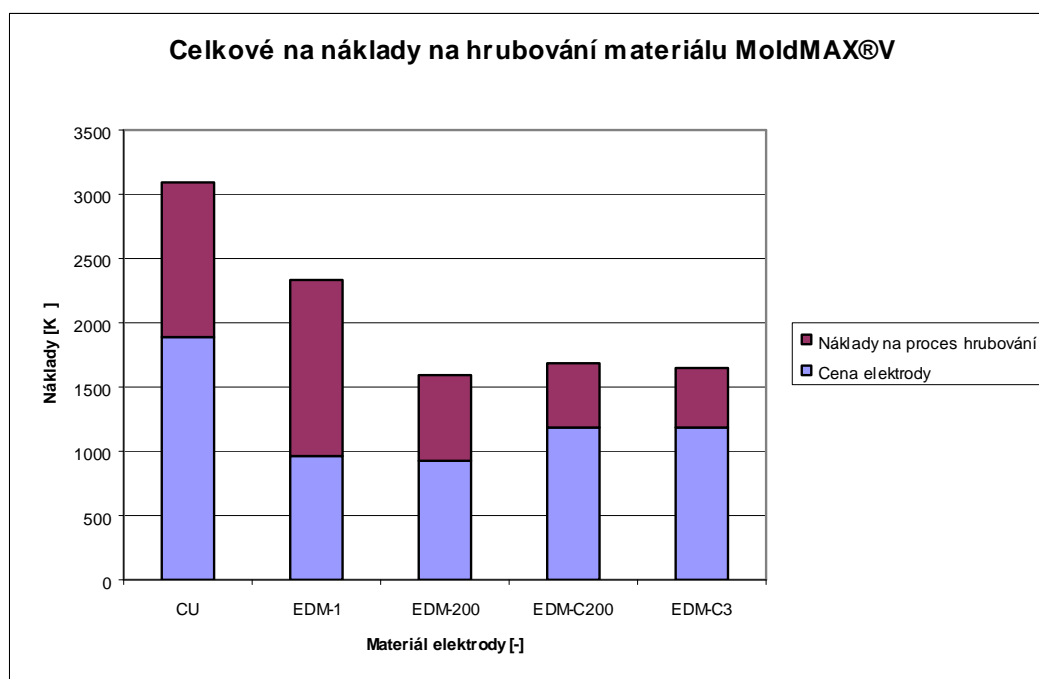
kde: CN_{hrub} – Celkové náklady na hrubování [Kč].

Celkové náklady na hrubování nástrojové oceli jsou uvedeny v grafu 5.16 a pro materiálu MoldMAX®V v grafu 5.17



Graf. 5.16 Celkové náklady na hrubování nástrojovou elektrodou

Nejnižší náklady na obrábění nástrojové oceli má elektroda z EDM-1, kde náklady činí 1 613 Kč. Nejvyšší je hrubování pomocí měděné elektrody, kde náklady dosahují výše 2 368 Kč.



Graf. 5.17 Celkové náklady na hrubování materiálu MoldMAX®V

Nejnižší náklady na hrubování materiálu MoldMAX®V jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-200, kde náklady na předhrubování dosahují výše 1 595 K , podobné náklady mají grafitové elektrody s předávkem materiálu EDM-C3 a EDM-C200, jejichž náklady na vyhloubení hrubováním jsou 1 654 K , respektive 1 681 K . Nejvyšší náklady na obrábění jsou u m d né elektrody, kde cena hrubování dosahuje výše 3 095 K , tato cena je dvojnásobná oproti cen hrubování EDM-200.

5.6.2 Náklady na dokon ování

Náklady na dokon ování se počítají stejně jako při hrubování.

$$N_{fin} = t_{fin} \cdot JCS_{EDM} \quad (21)$$

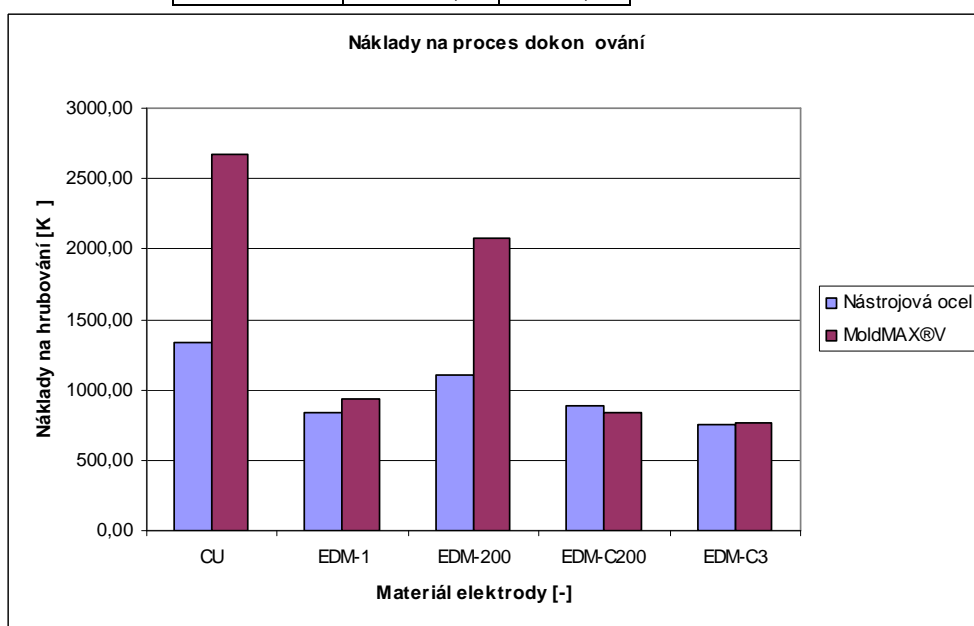
kde: N_{fin} – náklady na dokon ování [K],

t_{fin} – čas dokon ování [hod].

Náklady na dokon ování pro nástrojovou ocel a materiálu MoldMAX®V jsou zobrazeny v tabulce 5.16 a vyneseny do grafu 5.18

Náklady na dokon ování	Nástrojová ocel	Moldmax
CU	1337,76	2669,43
EDM-1	834,84	929,76
EDM-200	1108,12	2079,38
EDM-C200	881,45	833,28
EDM-C3	755,08	762,45

Tab. 5.16 Náklady na proces dokon ování



Graf. 5.18 Náklady na proces dokon ování

Celkové náklady na dokonování spoítáme podle vzorce:

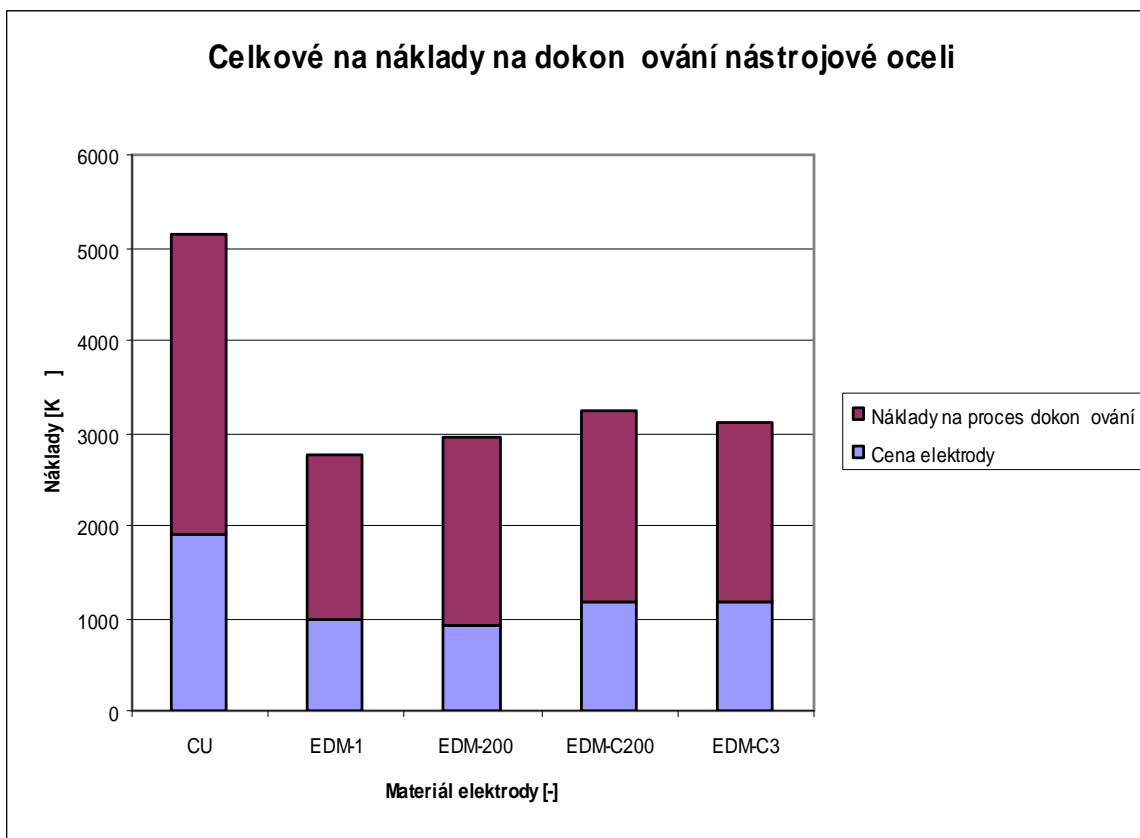
$$CN_{fin} = C_{el} + N_{fin} \quad (22)$$

kde: CN_{fin} – Celkové náklady na dokonování [K]

Celkové náklady na dokonování nástrojové oceli jsou uvedeny tab.5.17 a vyneseny v grafu 5.19 a pro materiál MoldMAX®V v tabulce 5.18 a grafu 5.20.

Elektroda	Cena elektrody [K]	Náklady na proces dokonování nástrojové oceli[K]	Celkové náklady na dokonování nástrojové oceli [K]
CU	1897	3235	5132
EDM-1	969	1804	2773
EDM-200	918	2026	2943
EDM-C200	1178	2059	3237
EDM-C3	1184	1939	3123

Tab. 5.17 Celkové náklady na dokonování nástrojové oceli

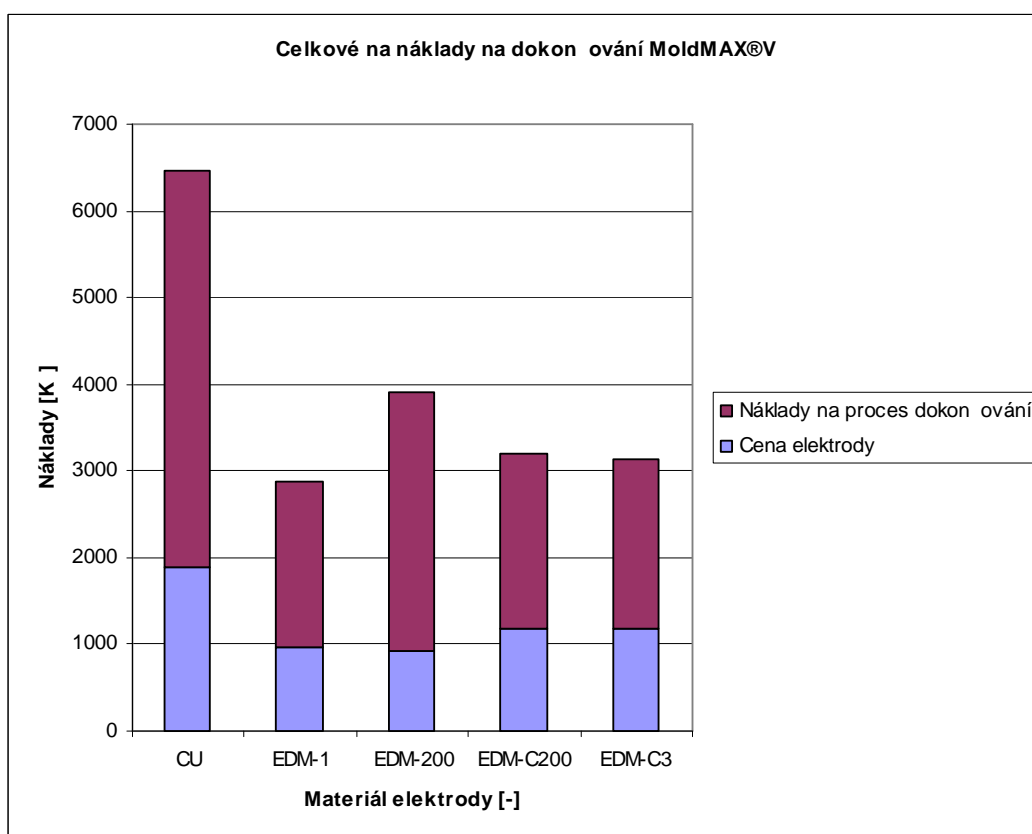


Graf. 5.19 Celkové náklady na dokonování nástrojové oceli

Celkové nejnížší náklady na dokonění nástrojové oceli jsou u materiálu z grafitu EDM-1, kde je cena 2 773 Kč. U ostatních grafitů je cena okolo 3000 Kč. U elektrody z m d i se dostáváme na téměř dvounásobné náklady.

Elektroda	Cena elektrody [Kč]	Náklady na proces dokonění materiálu MoldMAX®V [Kč]	Celkové náklady na dokonění materiálu MoldMAX®V [Kč]
CU	1897	4566	6463
EDM-1	969	1899	2868
EDM-200	918	2997	3914
EDM-C200	1178	2011	3189
EDM-C3	1184	1946	3130

Tab. 5.18 Celkové náklady na dokonění materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.20 Celkové náklady na dokonění materiálu MoldMAX®V

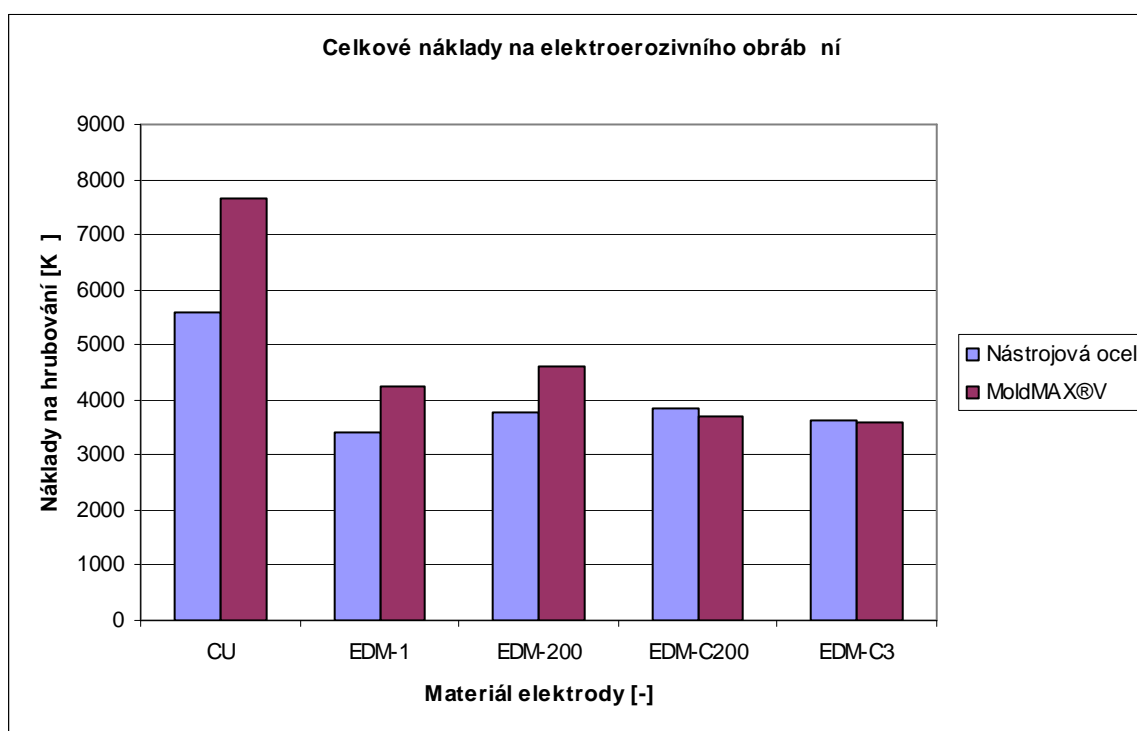
U obrábění materiálu MoldMAX®V jsou nejnížší náklady na dokonění u grafitu EDM-1 téměř pod 2 868 Kč. U grafitů sycených m d i celková cena přesahuje 3 000 Kč. Obrábění dokonovací elektrodou z m d i je velice nákladné a dosahuje ceny okolo 6 500 Kč.

5.6.3 Celkové náklady

Celkové náklady na elektroerozivní obrábění se skládají z celkových náklad na hrubování a dokonování. Přehled celkových náklad je uveden v tabulce 5.19 a v grafu 5.21.

Celkové náklady	Nástrojová ocel	MoldMAX®V
CU	5603,1	7661,6
EDM-1	3416,7	4232,0
EDM-200	3788,4	4592,5
EDM-C200	3836,6	3692,7
EDM-C3	3615,4	3600,8

Tab. 5.19 Celkové náklady na dokonování materiálu MoldMAX®V



Graf. 5.21 Celkové náklady na elektroerozivní obrábění

Z výsledků je patrné, že nejvyšší náklady na obrábění nástrojové oceli jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-1, kde náklady činí 3 416 K. Nejvyšší náklady na obrábění MoldMAX®V, jsou pomocí nástrojové elektrody z grafitu EDM-C3, kde náklady činí 3 600 K. Nejvyšší náklady na obrábění dopadla na materiál elektrody, kde obrábění materiálu MoldMAX®V stálo 7 661 K a obrábění nástrojové oceli 5 603 K.

5.6.4 Zhodnocení celkových nákladů při poruše vstřikovací formy

Při vyíslení výše ztráty vznikající firmě firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. nelze počítat pouze náklady na elektroerozivní obrábění, ale při posuzování vhodnosti využití nástrojových elektrod musí být brány do úvahy i náklady ztráty, které firmě vznikají při odstavení výrobní linky (vstřikovací formy). Výše ztráty při odstavení výrobní linky činí 4000 Kč za hodinu. Tato výše ztráty je použita při péči tu času na péči pravu nástrojové elektrody, docílení kvality povrchu a opotřebení na penoší vyjádření.

Doba péči pravu nástrojové elektrody:

$$ZT_{ele} = t_{vyroby_ele} \cdot OD$$

kde: ZT_{ele} – finální ztráta během výroby elektrody,
 t_{vyroby_ele} – doba výroby elektrody,
 OD – doba odstávky výrobní linky.

Doba obrábění:

$$ZT_{ob} = t_{obr} \cdot OD$$

kde: ZT_{ob} – finální ztráta během obrábění,
 t_{obr} – doba elektroerozivního obrábění,

Kvalita povrchu podle specifikace má být na obrobený povrch Rz 3,2 μm. Každé zlepšení povrchu o jedno Rz zabere nástroj i 5min.

$$ZT_{lesteni} = t_{lesteni} (OD + NPS)$$

Kde: $t_{lesteni}$ – doba leštění obrobku,
 NPS – náklady na pracovní sílu [Kč],
 $ZT_{lesteni}$ – finální ztráta během leštění.

Opotřebení elní plochy elektrody způsobuje delší dobu obrábění:

$$t_{op} = \frac{op_{fin} + op_{fin}}{v_{op_fin}}$$

kde: t_{op} .. doba potřebná k obrobení nep esnosti z opot ebení
 op_{hr} .. opot ebení hrubovací elektrody
 op_{fin} .. opot ebení dokon ovací elektrody
 v_{op_fin} .. velikost úb ru dokon ovací elektrody

$$ZT_{op} = t_{op} \cdot OD$$

kde: ZT_{op} .. Finan ní ztráta b hem lezt ní

Následn se vzechny díl í finan ní ztráty pro jednotlivé experimenty se tou a p i tou se náklady na elektroerozivní obráb ní.

$$ZCN = ZT_{ele} + ZT_{ob} + ZT_{op} + CN_{EDM}$$

kde: ZCN .. zhodnocení celkových náklad
 CN_{EDM} .. celkové náklady na elektroerozivní obráb ní

P i zhodnocení celkových náklad , vyzla nejlépe elektroda z grafitu s p ídavkem m di EDM-C3 jak pro obráb ní nástrojové oceli tak pro obráb ní materiálu MoldMAX®V tab. 5.20 a 5.21.

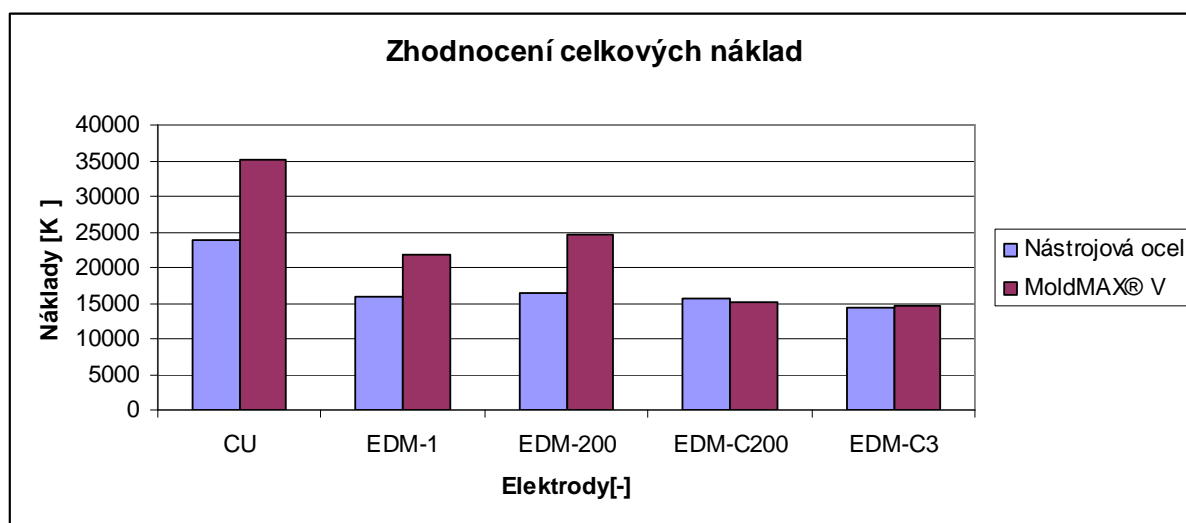
Hodnotící parametr	Nástrojová ocel (HPM7)				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Ekonomické hodnocení[K]	5603	3417	3788	3837	3615
as obráb ní[K]	8428	6889	7847	6900	5811
Rychlost p ípravy elektrod[K]	7775	3835	3835	3835	3835
Kvalita povrchu[K]	1650	1650	660	990	990
Nep esnost výroby[K]	379	165	160	102	63
Zhodnocení celkových náklad [K]	23835	15955	16289	15663	14314

Tab. 5.20 Zhodnocení celkových náklad nástrojové oceli

Hodnotící parametr	MoldMAX® V				
	CU	EDM-1	EDM-200	EDM-C200	EDM-C3
Ekonomické hodnocení[K]	7662	4232	4593	3693	3601
as obráb ní[K]	18019	10687	12847	6230	5743
Rychlost p ípravy elektrod[K]	7775	3835	3835	3835	3835
Kvalita povrchu[K]	990	1650	990	990	990
Nep esnost výroby[K]	723	1296	2343	488	444
Zhodnocení celkových náklad [K]	35168	21700	24607	15235	14613

Tab. 5.21 Zhodnocení celkových náklad materiálu MoldMAX®V

V grafu 5.21 jsou porovnány celkové náklady na elektroerozivní obrábění nástrojové oceli a materiálu MoldMAX®V pomocí měděných a grafitových elektrod.



Graf. 5.21 Zhodnocení celkových náklad

6. Shrnutí a hodnocení výsledk

Diplomová práce se zabývá elektroerozivním obráběním nástrojové oceli a materiálu MoldMAX®V pomocí m d ných a grafitových nástrojových elektrod.

V úvodu diplomové práce pro je stanoven hlavní cíl porovnat obrábění pomocí jednotlivých elektrod z ekonomického hlediska pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Dílčí cíle jsou porovnat elektroerozivní obrábění z hlediska času obrábění, opotřebení nástrojových elektrod, rychlosti přípravy jednotlivých elektrod, kvality obráběné plochy a vhodnosti jednotlivých typ elektrod.

Další kapitola popisuje teorii elektroerozivního obrábění. Zde jsou shrnuty teoretické poznatky o elektroerozivním obrábění. Následující kapitola popisuje metodiku experimentu, tvary a materiál použitých nástrojových elektrod, druhy obráběných materiálů. Z důvod časové náročnosti experimentu a zároveň provádění testů při běžném provozu nástrojárny, byla provedena opakovatelnost v podmínkách

Experiment obrábění materiálu MoldMAX®V m d nou elektrodou byl opakován p tkrát, na základě výsledků experimentu byly všechny další experimenty prováděny pouze jednou.

V experimentální části je popsán způsob přípravy na experiment a samotný průběh experimentu.

Následující kapitola se zabývá výsledky experimentu. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější pro obrábění nástrojové oceli využití grafitové elektrody EDM-1, kde náklady na jeden experiment činí 3 416 Kč. Pro obrábění materiálu MoldMAX®V jsou nejnižší náklady při použití grafitové elektrody EDM-C3, kde náklady na jeden experiment činí 3 600 Kč.

Nejrychlejší obrábění nástrojové elektrody bylo pomocí elektrody z grafitu EDM-C3, kde hrubování a dokončování trvalo 88 min. Nejrychlejší obrábění materiálu MoldMAX®V byla také elektroda z grafitu EDM-C3, kde čas obrábění byl 87 min.

Pro výrobu všech grafitových elektrod byl použit stejný obráběcí program. Z tohoto důvodu nejkratší čas výroby elektrody byl 88 min u všech grafitových elektrod stejný. Pro výrobu m d ných elektrod nešel tento program použít,

z dle vodí horší obrobitelnosti m dle. Rychlost výroby elektrody z m dle trvala dvojnásobný čas.

Opotřebení elní plochy při hrubování bylo zvoleno v milimetrech. Nejlepší opotřebení elní plochy elektrod při hrubování nástrojové oceli měla elektroda z grafitu EDM-C3 a to 0,01 mm. Opotřebení elní plochy při hrubování materiálu MoldMAX[®]V bylo dosaženo podobných výsledků hned u těch testovaných elektrod a to EDM-C200 s opotřebením elní plochy 0,132 mm, EDM-C3 0,134 mm a m dle elektrodou, kde elní opotřebení bylo 0,139 mm. Pro dokončovací elektrody byl zvolen relativní poměr opotřebení. Procento opotřebení elní plochy při obrábění nástrojové oceli dopadlo nejlépe pomocí grafitové elektrody syčené m dle EDM-C3 a bylo 2,16 %. Procento opotřebení elní plochy při obrábění materiálu MoldMAX[®]V dopadlo také nejlépe pomocí grafitové elektrody syčené m dle EDM-C200 a bylo 10,22 %.

Nejlepší naměřená hodnota drsnosti povrchu po obrábění nástrojové oceli byla Rz 6 m obrábění m dle elektrodou. Po obrábění materiálu MoldMAX[®]V byla nejlepší hodnota Rz 5,1 m obrábění nástrojovou elektrodou z EDM-200.

Další kritérium pro výrobu elektrod je jejich vhodnost pro konkrétní tvar elektrody. V tomto testu se neprojevil žádný rozdíl mezi grafitovou a m dle elektrodou, ale při obrábění tenkých a hlubokých otvorů je zcela nevhodné použití m dle elektrod vzhledem jejich malé pevnosti.

Na závěr bylo provedeno hodnocení celkových nákladů z hlediska dosažení co nejmenší ztráty při odstavení výrobní linky. Do těchto nákladů byla zahrnuta cena doby elektroerozivního obrábění, opravy nástrojové elektrody, docílení kvality povrchu, opotřebení a náklady na obrábění. Výsledek tohoto zhodnocení ukazuje výhodnost grafitové elektrody syčené m dle EDM-C3 jak pro obrábění nástrojové oceli tak materiálu MoldMAX[®]V. Váha těchto ukazatelů je použitelná pouze pro firmu DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o..

Seznam použité literatury

1. MORRÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Plzeň : ZVU Plzeň, 1994. 161 s. ISBN 80-7082-161-2.
2. ASA, J. MM Průmyslové spektrum 7,8 2007, str. 60,61
3. www.oelheld.de/download/Senkerosion.pdf 2.4.2011
4. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. VUT Praha, Ediční středisko, 1989.
5. <http://www.tedok.cz/> 15.3.2011 <http://www.tedok.cz/tabulka-spravne-volby>
6. SN ISO 8688-1
7. Denso [on-line] www.denso.cz 24.2.2011
8. ASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. vyd. Praha, Scientia, spol. s r.o., 2000. 256 s. 80-7183-207-3.
9. MLEJNEK, M. *Návrh hospodárného postupu obrábění tvarových částí tlakových forem pro lití hliníkových slitin ve firmě TřodaAuto Mladá Boleslav*. [Diplomová práce]. Liberec, TU v Liberci, 2005- 76 s.
10. MUNDUCH, O. *Návrh hospodárného postupu obrábění matic stříhacích nástrojů ve firmě Svoboda & Stamping, s.r.o. Jihlava*. [Bakalářská práce]. Liberec, TU v Liberci, 2010. 57 s.
11. <http://www.service-edm.com/machines/oldest-die-sinking/roboform23.jpg> 15.5.2011

Přílohy